



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Mecânica

**Ano 2018**

**João Pedro  
Ramos Garcia**

**Análise e avaliação do desempenho energético  
na produção da empresa Porfic**





**João Pedro  
Ramos Garcia**

**Análise e avaliação do desempenho energético  
na produção da empresa Porfic**

Relatório apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Mestre Miguel da Silva Oliveira, Assistente Convidado do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro.



## **O júri**

### **Presidente**

Professor Doutor Fernando José Neto da Silva  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

### **Arguente**

Professor Doutor João Carlos de Oliveira Matias  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

### **Orientador**

Mestre Miguel da Silva Oliveira  
Assistente Convidado da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

As minhas palavras de agradecimento dirigem-se:

Aos meus pais, pela sua presença ativa em todos os momentos importantes da minha vida, onde se inserem, especialmente, os anos de frequência deste curso;

À Inês, pela sua disponibilidade e gosto em estar presente nas mais diversas ocasiões, oferecendo o seu contributo, sempre que possível;

Ao meu orientador, Mestre Miguel Oliveira e ao Professor Fernando Neto, pelo acompanhamento do estágio e pelo aconselhamento fornecido durante o mesmo;

À Universidade de Aveiro e à Galp Energia, pela oportunidade de participação no programa de estágios onde se insere o trabalho desenvolvido, que contribuiu significativamente para a minha valorização pessoal e profissional;

À Porfic, pela receção afável e pela forma como todos os colaboradores, sem exceção, tudo fizeram para contribuir, da melhor forma possível, para o meu trabalho, desenvolvido nas suas instalações.





## Palavras-chave

Eficiência energética, eletricidade, gestão de energia, poupança, propano.

## Resumo

No contexto industrial, a gestão de energia apresenta-se como uma ferramenta crucial para a eficiência energética. A adoção de uma política de eficiência possibilita o alcance de mais-valias como a redução da fatura energética e o aumento da produtividade e competitividade da empresa, ao nível do consumidor, repercutindo-se também a nível global, através do decréscimo nos preços de energia e nas emissões de gases de efeito de estufa.

É, pois, neste contexto que surge o presente trabalho, desenvolvido nas instalações de uma empresa do setor da fundição, Porfic, especializada na produção de peças em alumínio e zamak, através do processo de fundição injetada. De facto, os processos de fundição são, geralmente, caracterizados pela elevada exigência a nível de consumo de energia. Nesse sentido, torna-se evidente a importância de proceder a uma gestão correta de energia nas empresas deste setor, assente em práticas de eficiência energética.

Os principais objetivos deste estudo consistiram na contextualização da empresa com o SGCIE, na identificação de oportunidades de melhoria e, finalmente, na sugestão de medidas de eficiência energética, com vista à otimização do processo produtivo da Porfic.

Para o efeito, o procedimento laboral incidiu essencialmente sobre o levantamento energético e a monitorização de diversos equipamentos da empresa, o que permitiu, posteriormente, efetuar a desagregação de consumos e aferir custos específicos de energia.

A implementação conjunta das medidas de eficiência sugeridas permitiria à Porfic alcançar uma redução de 5% no valor do seu consumo energético anual (38 tep), avaliada em cerca de 69 910€ (economia anual de 12%), mediante um investimento recuperável em cerca de 16 meses.



**Keywords**

Electricity, energy efficiency, energy management, propane, savings.

**Abstract**

In industry, energy management presents itself as a crucial tool to reach energy efficiency. At the consumer level, the adoption of efficiency policies provides several advantages, such as the energy invoice reduction or the increase of the business productivity and competitiveness. Furthermore, the advantages are also noted on a global scale, through the decrease in the energy prices and in the emission of greenhouse effect gases.

It is within that context that the present work arises, carried out in the facilities of a company from the foundry sector, Porfic, specialized in aluminium and zamak parts production, through die casting.

As a matter of fact, casting processes have the reputation of being highly energy demanding. This situation emphasises the importance of a proper energy management, based on energy efficiency practices, in companies from that sector.

The purpose of this study is to frame the company in the SGCIE context, seek for improvement opportunities and suggest efficiency measures, in order to optimize Porfic's productive process.

To achieve these goals, the labour procedure consisted in the company energy survey and machine monitoring. Thus, it was possible to complete the consumptions disaggregation and calculate specific energy costs.

The joint implementation of these measures would lead Porfic to a decrease of 5% in the value of its annual energy consumption (38 toe), evaluated at approximately 69 910€ (annual economy of 12%), against an investment with a payback of nearly 16 months.



## Índice

|   |    |
|---|----|
| 1 – Introdução e revisão bibliográfica.....   | 1  |
| 1.1 – Gestão de energia como ferramenta de eficiência .....                             | 1  |
| 1.2 – Enquadramento do setor da fundição nos panoramas mundial, europeu e nacional..... | 3  |
| 1.2.1 – Fundição no mundo .....   | 3  |
| 1.2.2 – Fundição no contexto europeu.....   | 5  |
| 1.2.3 – Setor da Fundição em Portugal.....  | 6  |
| 1.3 – Consumo de energia e eficiência energética no setor da fundição .....             | 7  |
| 1.3.1 – Valores típicos de consumo de energia em fundição .....                         | 7  |
| 1.3.2 – Eficiência energética em fundição .....   | 10 |
| 1.4 – Enquadramento e objetivos .....   | 12 |
| 1.5 – Plano de trabalho .....   | 12 |
| 1.6 – Estrutura do documento .....  | 13 |
| 2 – A empresa.....  | 15 |
| 2.1 – Análise geral da empresa .....  | 15 |
| 2.1.1 – O Produto e as suas aplicações.....   | 16 |
| 2.1.2 – Equipamentos de produção.....   | 16 |
| 2.1.3 – Serviços .....  | 17 |
| 2.2 – Análise operacional da empresa .....  | 17 |
| 2.2.1 – Processo produtivo da empresa .....   | 17 |
| 2.2.2 – Matérias-primas utilizadas e materiais reciclados no processo produtivo .....   | 25 |
| 3 – Matriz energética da empresa .....  | 27 |
| 3.1 – Caracterização da situação energética da empresa.....                             | 27 |
| 3.1.1 – Levantamento energético.....  | 27 |
| 3.1.2 – Contextualização com a legislação (SGCIE).....                                  | 28 |
| 3.1.3 – Oportunidades de financiamento e incentivos.....                                | 29 |
| 3.1.4 – Penalidades .....   | 30 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2 – Desagregação dos consumos da empresa por vetor energético .....                        | 30 |
| 3.2.1 – Energia elétrica .....   | 31 |
| a) Iluminação.....   | 31 |
| b) Máquinas .....  | 33 |
| 3.2.2 – Propano .....  | 34 |
| 3.3 – Zamak e Alumínio na Porfic: Consumo energético e custos associados.....                | 35 |
| 3.4 – Racionalização de energia na empresa: Medidas de sensibilização interna.....           | 37 |
| 4 – Medidas de eficiência energética: Sugestões de implementação e estimativa de poupanças . | 39 |
| 4.1 – Aquisição de uma bateria de condensadores .....  | 39 |
| 4.2 – Substituição do compressor de velocidade fixa por um compressor com VEV .....          | 43 |
| 4.2.1 – Investimento e Poupança .....  | 45 |
| 4.3 – Análise Propano Vs Eletricidade.....   | 47 |
| 4.3.1 – Equipamentos de medição utilizados .....   | 47 |
| 4.3.2 – Equipamentos de produção analisados .....  | 47 |
| 4.3.3 – Metodologia e resultados .....   | 49 |
| 4.3.4 – Conclusões e estimativas de poupança .....   | 50 |
| 4.4 – Renovação do isolamento térmico dos fornos de alumínio operantes a propano.....        | 52 |
| 4.4.1 – Introdução aos fenómenos de transferência de calor .....                             | 52 |
| 4.4.2 – Metodologia e resultados obtidos .....   | 55 |
| 4.4.3 – Conclusões e oportunidades de melhoria .....   | 63 |
| 4.4.4 – Impacto da renovação da lâ de vidro – Poupança energética e económica .....          | 64 |
| 5 – Conclusões.....  | 69 |
| 5.1 – Síntese das sugestões de medidas a implementar com estimativa de tempo de retorno .    | 69 |
| 5.2 – Sugestões de tarefas futuras.....  | 71 |
| Referências.....   | 75 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Múltiplos benefícios da eficiência energética.....  | 2  |
| Figura 2 - Consumo de energia, global e por grupo de países, com e sem poupança de energia associada ao aumento da eficiência energética. .... | 3  |
| Figura 3 - Melhoria de eficiência energética, em diferentes países. ....   | 3  |
| Figura 4 - Valores de produção anual associada à fundição, em toneladas, em diferentes regiões do globo.....                                   | 4  |
| Figura 5 - Vendas associadas a fundição em Portugal. ....  | 6  |
| Figura 6 - Evolução da produção, em toneladas, associada a fundição de metais ferrosos e não ferrosos. ....                                    | 7  |
| Figura 7 - Principais áreas de aplicação dos produtos de fundição em Portugal.....   | 7  |
| Figura 8 - Consumo de energia e consumo específico de energia no mercado dos E.U.A. ....   | 8  |
| Figura 9 - Perdas de metal no processo de fundição em areia. ....  | 10 |
| Figura 10 - Fachada da empresa. ....   | 15 |
| Figura 11 - Exemplos de peças produzidas na empresa.. ....   | 16 |
| Figura 12 - Representação esquemática do processo de injeção em câmara quente. ....  | 18 |
| Figura 13 - Representação esquemática do processo de injeção em câmara fria.....   | 18 |
| Figura 14 - Forno Fusor (FF01). ....   | 19 |
| Figura 15 - Alimentação da máquina de injeção.....   | 19 |
| Figura 16 - Processo de solidificação de metal com fenómeno de contração.....  | 21 |
| Figura 17 - Processo de fundição injetada. ....  | 21 |
| Figura 18 - Exemplo de molde utilizado na empresa. ....  | 22 |
| Figura 19 - Lixas e polidores manuais. ....  | 22 |
| Figura 20 - Equipamentos de maquinaria da empresa.....   | 23 |
| Figura 21 - Vibração com recurso a "palha" e a cones abrasivos. ....   | 23 |
| Figura 22 - Granalhadora. ....   | 24 |
| Figura 23 - Linha de pintura da empresa. ....  | 25 |
| Figura 24 - Secção de embalamento. ....  | 25 |
| Figura 25 - Penalidades de não cumprimento das metas definidas no ARCE.....  | 30 |
| Figura 26 - Configuração trigonométrica entre potência ativa, reativa e aparente ....  | 40 |
| Figura 27 - Avanço da tensão relativamente à corrente.....   | 40 |
| Figura 28 - Esquema representativo da utilização de energia reativa com e sem condensador. ...   | 41 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 29 - Instalação do analisador de energia no novo compressor. ....                           | 45  |
| Figura 30 - Contador de propano. ....  | 47  |
| Figura 31 - Analisador de energia HT Vega 76. ....   | 47  |
| Figura 32 - Máquina de zamak com forno elétrico, F01. ....   | 48  |
| Figura 33 - Máquina de alumínio com forno elétrico, F14. ....                                      | 48  |
| Figura 34 - Máquina de zamak com forno a gás, F02. ....  | 49  |
| Figura 35 - Máquina de alumínio com forno a gás, F10. ....   | 49  |
| Figura 36 - Esquema ilustrativo da aproximação efetuada nos cálculos de radiação. ....             | 54  |
| Figura 37 - Fatores de forma para retângulos paralelos alinhados e discos paralelos coaxiais. .... | 55  |
| Figura 38 - Forno de alumínio a gás. ....  | 55  |
| Figura 39 - Abertura do forno de alumínio a gás. ....  | 55  |
| Figura 40 - Interior do forno de alumínio a gás. ....  | 56  |
| Figura 41 - Representação da vista de cima do forno. ....  | 56  |
| Figura 42 - Forno de alumínio elétrico e respetiva abertura. ....                                  | 58  |
| Figura 43 - Circuito térmico equivalente para uma parede composta, em série. ....                  | 60  |
| Figura 44 - Interior de um forno de alumínio elétrico. ....  | 61  |
| Figura 45 - Representação da vista de cima dos fornos de alumínio a gás, com lã de vidro. ....     | 64  |
| Figura 46 - Composição química das ligas de zamak. ....  | 84  |
| Figura 47 - Forno Fusor FF01. ....   | 107 |



## Índice de Gráficos

|   |     |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Distribuição mundial dos valores de produção associada à fundição.....  | 5   |
| Gráfico 2 - Distribuição típica de consumo energético em fundição.....  | 9   |
| Gráfico 3 - Distribuição típica de custos energéticos em fundição.....  | 9   |
| Gráfico 4 - Distribuição mensal do consumo de energia da empresa. ....  | 28  |
| Gráfico 5 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a iluminação. ....  | 32  |
| Gráfico 6 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a fornos elétricos e à força motriz utilizada pelos equipamentos..... | 33  |
| Gráfico 7 - Desagregação do consumo de propano.....   | 34  |
| Gráfico 8 - Custo de energia e metal para zamak e alumínio. ....  | 36  |
| Gráfico 9 - Perfil de funcionamento do compressor inicial.....  | 44  |
| Gráfico 10 - Perfil de funcionamento do novo compressor.....  | 46  |
| Gráfico 11 - Distribuição anual do consumo de eletricidade pelos diferentes períodos.....   | 87  |
| Gráfico 12 - Evolução do consumo de propano ao longo da monitorização.....  | 110 |
| Gráfico 13 - Variação do valor de temperatura ao longo da monitorização.....  | 111 |



## Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Valores mundiais de produção para fundição de diferentes metais. ....  | 4  |
| Tabela 2 - Fundição de metais ferrosos e não ferrosos em Portugal.....  | 6  |
| Tabela 3 - Levantamento energético da empresa (ano de 2017). ....   | 27 |
| Tabela 4 - Indicadores energéticos (ano de 2017). ....  | 28 |
| Tabela 5 - Custo associado a cada vetor energético. ....  | 31 |
| Tabela 6 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a iluminação. ....   | 31 |
| Tabela 7 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a fornos elétricos e à força motriz utilizada pelos equipamentos. .... | 33 |
| Tabela 8 - Desagregação do consumo de propano. ....   | 34 |
| Tabela 9 - Dados relativos a fundição e injeção de zamak e alumínio, na empresa.....  | 35 |
| Tabela 10 - Investimento associado à bateria de condensadores. ....   | 42 |
| Tabela 11 - Poupança e tempo de retorno de investimento. ....   | 42 |
| Tabela 12 - Dados do compressor em regime de alívio. ....   | 44 |
| Tabela 13 - Dados do compressor em regime de carga.....   | 44 |
| Tabela 14 - Tensão, fator de potência e potência média do compressor.....   | 44 |
| Tabela 15 - Dados de funcionamento do novo compressor. ....   | 45 |
| Tabela 16 - Poupança associada à substituição do compressor. ....   | 45 |
| Tabela 17 - Investimento e tempo de retorno.....  | 45 |
| Tabela 18 - Resultados obtidos para zamak.....  | 50 |
| Tabela 19 - Resultados obtidos para alumínio.....   | 50 |
| Tabela 20 - Diferença de custos de produção de zamak com recurso a gás e eletricidade. ....   | 51 |
| Tabela 21 - Diferença de custos de produção de alumínio com recurso a gás e a eletricidade. ....  | 51 |
| Tabela 22 - Variáveis utilizadas nos cálculos do forno de alumínio a propano. ....  | 57 |
| Tabela 23 - Perdas por condução e radiação. ....  | 58 |
| Tabela 24 - Perdas por convecção.....   | 58 |
| Tabela 25 - Perdas por transferência de calor no forno de alumínio a gás. ....  | 58 |
| Tabela 26 - Variáveis utilizadas nos cálculos do forno de alumínio elétrico.....  | 62 |
| Tabela 27 - Perdas por condução e radiação. ....  | 62 |
| Tabela 28 - Perdas por convecção.....   | 62 |
| Tabela 29 - Perdas por transferência de calor no forno de alumínio a eletricidade. ....   | 62 |
| Tabela 30 - Variáveis utilizadas nos cálculos dos fornos de zamak.....  | 63 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 31 - Perdas por transferência de calor nos fornos de zamak. ....  | 63  |
| Tabela 32 - Perdas por transferência de calor, para fornos de alumínio a gás, antes e depois da renovação da lâ de vidro. .... | 66  |
| Tabela 33 - Poupança associada à renovação do isolamento em fornos de alumínio a propano... 66                                 | 66  |
| Tabela 34 – Investimento e poupança associados às sugestões. ....  | 70  |
| Tabela 35 - Estimativa de tempo de retorno associado às medidas a implementar. ....  | 71  |
| Tabela 36 - Impacto das sugestões de medidas a implementar: Poupança económica, energética e redução de emissões.....          | 73  |
| Tabela 37 - Propriedades das ligas de zamak.....   | 84  |
| Tabela 38 - Propriedades das ligas de alumínio.....  | 85  |
| Tabela 39 - Composição química das ligas de alumínio. ....   | 85  |
| Tabela 40 - Fornecimento de propano (2017). ....   | 87  |
| Tabela 41 - Fatores de conversão utilizados no levantamento. ....  | 87  |
| Tabela 42 - Consumo de energia elétrica (2017). ....   | 87  |
| Tabela 43 - Levantamento dos equipamentos de iluminação. ....  | 89  |
| Tabela 44 - Levantamento das máquinas. ....  | 91  |
| Tabela 45 - Levantamento das máquinas (continuação). ....  | 93  |
| Tabela 46 - Levantamento das máquinas (continuação). ....  | 95  |
| Tabela 47 - Levantamento dos queimadores.....  | 97  |
| Tabela 48 - Dados de faturação de energia reativa na empresa. ....   | 101 |
| Tabela 49 - Estudo de custo específico de energia para a máquina F01. ....   | 103 |
| Tabela 50 - Estudo de custo específico de energia elétrica para a máquina F02. ....  | 103 |
| Tabela 51 - Estudo de custo específico de energia térmica para a máquina F02.....  | 103 |
| Tabela 52 - Estudo de custo específico de energia elétrica para o sistema de injeção da máquina F14.....                       | 105 |
| Tabela 53 - Estudo de custo específico de energia elétrica para o forno da máquina F14. ....                                   | 105 |
| Tabela 54 - Estudo de custo específico de energia elétrica para a máquina F10. ....  | 105 |
| Tabela 55 - Estudo de custo específico de energia térmica para a máquina F10.....  | 105 |
| Tabela 56 - Dados utilizados nos cálculos. ....  | 109 |
| Tabela 57 - Variáveis monitorizadas. ....  | 109 |
| Tabela 58 - Comparação entre valores teóricos e de funcionamento.....  | 109 |
| Tabela 59 - Resultados obtidos no procedimento. ....   | 110 |

## Índice de Anexos

|  |     |
|--|-----|
| Anexo A – Fluxograma produtivo da empresa .....                                  | 81  |
| Anexo B – Propriedades das ligas de zamak e de alumínio .....                    | 83  |
| Anexo C – Levantamento energético e desagregação de consumos .....               | 87  |
| Anexo D – Variação da densidade de propano em função da pressão de serviço ..... | 99  |
| Anexo E – Proposta de aquisição de uma bateria de condensadores .....            | 101 |
| Anexo F - Análise Propano Vs Eletricidade .....                                  | 103 |
| Anexo G – Monitorização do forno fusor FF01 .....                                | 107 |



## Lista de Acrónimos

**ADENE** – Agência para a energia

**AIE** – Agência internacional de energia

**APF** – Associação portuguesa de fundição

**ARCE** – Acordo de racionalização dos consumos energéticos

**CAEF** – *The european foundry association*

**CE** – Consumo específico de energia (indicador energético)

**CIE** – (Instalação) consumidora intensiva de energia

**CNC** – Comando numérico computadorizado

**DETR** – *Departmente of environment, transport and the regions*

**DGEG** – Direção geral de energia e geologia

**ERSE** – Entidade reguladora dos serviços energéticos

**GPL** – Gás de petróleo liquefeito

**IC** – Intensidade carbónica (indicador energético)

**IE** – Intensidade energética (indicador energético)

**ISP** – Imposto sobre produtos petrolíferos

**PCI** – Poder calorífico inferior (propano)

**PME** – Pequena e média empresa

**PPEC** – Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia

**PREn** – Plano de racionalização dos consumos de energia

**REP** – Relatório de execução e progresso

**SGCIE** – Sistema de gestão dos consumos intensivos de energia

**VEV** – Variador eletrónico de velocidade

**WFO** – *World foundry organization*



## Lista de Símbolos

€ - Euro

$\rho$  - Densidade ou massa específica

°C - Graus centígrados

$\mu\text{m}$  - Micrómetro

A - Ampere

bar – Bar

Btu – *British thermal unit*

$\text{cm}^3$  - Centímetro cúbico

g - Grama

GJ - Gigajoule

GPa - Gigapascal

h - Hora

J - Joule

K - Kelvin

kg - Quilograma

kgep – Quilograma equivalente de petróleo

kJ – Quilojoule

kvar – Quilovolt-ampere reativo

kW - Quilowatt

kWh - Quilowatt-hora

m – Metro

M€ - Milhões de euros

**m<sup>2</sup>** - Metro quadrado

**m<sup>3</sup>** - Metro cúbico

**mbar** - Milibar

**min** - Minuto

**MJ** – Megajoule

**mm** - Milímetro

**mol** - Mole

**MPa** – Megapascal

**MW** - Megawatt

**MWh** - Megawatt-hora

**Pa** – Pascal

**s** – Segundo

**TBtu** – Tera-*british thermal unit*

**tep** – Tonelada equivalente de petróleo

**TJ** - Terajoule

**ton** – Tonelada

**tonCO<sub>2</sub>e** - Toneladas de dióxido de carbono equivalente

**V** - Volt

**W** - Watt

# 1 – Introdução e revisão bibliográfica

## 1.1 - Gestão de energia como ferramenta de eficiência

A energia assume, atualmente, um papel fundamental nas organizações, independentemente do tipo de indústria ou da área de negócio [1], devendo ser, por esse motivo, considerada tão relevante quanto o trabalho, o capital ou as matérias-primas [2].

Na natureza, a energia apresenta-se sob a forma inicial de energia primária, sob a forma de recurso renovável, no caso da energia solar, hídrica ou eólica, e não renovável, no caso dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão ou gás natural). Esta forma de energia é passível de ser transformada numa forma final, para consumo e produção de trabalho, como a energia elétrica ou os combustíveis (gasolina, gasóleo, entre outros). Todo o processo de produção, distribuição e utilização da energia, pode ser dividido em duas fases: transformação e utilização [3] [4].

Os processos de transformação de energia são responsáveis por impactos negativos no meio ambiente e parte das perdas associadas a estes processos devem-se à falta de otimização dos sistemas. Na fase de utilização de energia, é frequente a utilização do termo “Utilização Racional de Energia” (URE), que pressupõe a adoção de medidas que permitam aumentar a eficiência energética, com vantagens do ponto de vista económico e ambiental [3].

O constante desenvolvimento tecnológico e industrial e a melhoria contínua dos padrões de qualidade de vida da sociedade são acompanhados de uma crescente necessidade de consumo de energia [5]. Desta forma, é importante que a utilização dos recursos energéticos seja feita de forma consciente e responsável, garantido assim a sua sustentabilidade e a continuidade do desenvolvimento social.

Para o efeito, no contexto industrial, a gestão de energia deve ser efetuada de forma tão criteriosa como, por exemplo, a gestão de recursos humanos ou financeiros [2]. É aconselhável a realização de auditorias energéticas periódicas, com a elaboração dos respetivos planos de racionalização de energia, implementação de medidas e investimentos associados. Existem ainda incentivos e oportunidades de financiamento, no sentido de mobilizar as empresas para a eficiência energética.

A eficiência energética repercute-se, de forma direta, ao nível do consumidor, conferindo vantagens como:

- A redução da fatura energética;
- O conhecimento mais profundo das próprias instalações, do consumo e do custo energético associados a cada processo ou equipamento;
- O aumento de produtividade da empresa, bem como da sua competitividade no mercado.

No entanto, o recurso a políticas de utilização racional de energia reflete-se também a nível global (Figura 1).



Figura 1 - Múltiplos benefícios da eficiência energética.  
Fonte: [6]

A eficiência energética subiu 13% entre 2000 e 2016 [6]. Sem esta melhoria, o valor de consumo de energia no mercado mundial teria sido 12% mais elevado em 2016 – percentagem equivalente ao contributo da União Europeia para o valor de consumo mundial de energia, na sua forma final, registado nesse ano [6] (Figura 2).

A Agência Internacional de Energia (AIE) ou *International Energy Agency (IEA)* é uma organização autónoma que trabalha no sentido de assegurar uma energia fiável, acessível e limpa, não só para os seus países membros (entre os quais se encontra Portugal), como para os restantes países mundiais [7]. A poupança de energia, associada ao aumento de eficiência, alcançada nos países membros da AIE corresponde a metade do valor total de poupança global (mundial). Esta informação, vista por outro prisma, equivale a dizer que a poupança conseguida nos referidos

países é igual ao somatório dos atuais valores de consumo de energia de Alemanha, França e Reino Unido [8].

Em Portugal, registou-se uma melhoria de cerca de 17% no valor de eficiência energética, entre 2000 e 2016 (Figura 3).

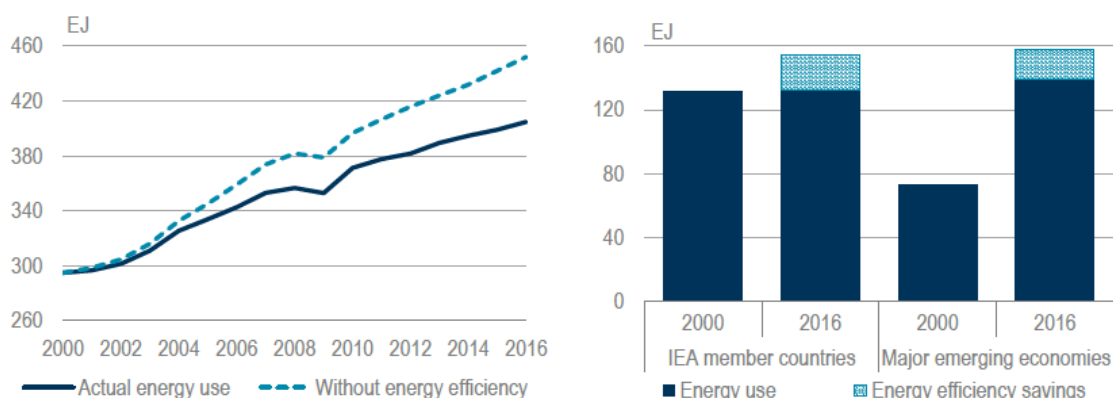


Figura 2 - Consumo de energia, global (esquerda) e por grupo de países (direita), com e sem poupança de energia associada ao aumento da eficiência energética. Fonte: [8]

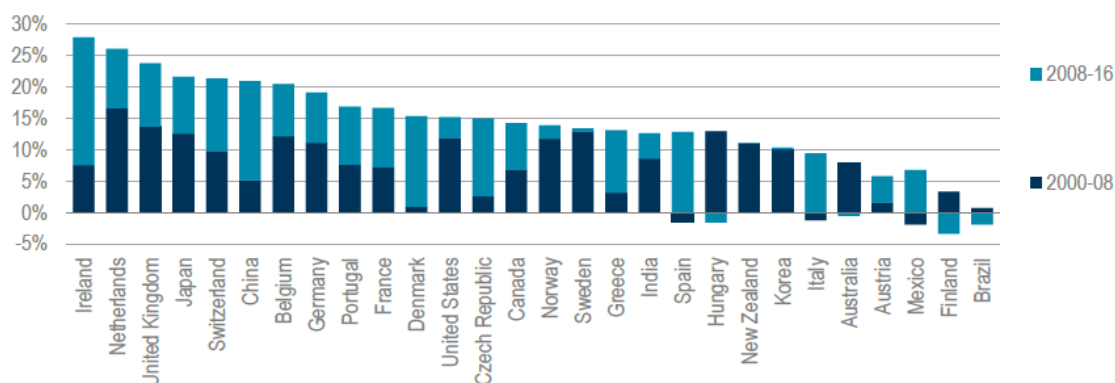


Figura 3 - Melhoria de eficiência energética, em diferentes países. Fonte: [8]

## 1.2 – Enquadramento do setor da fundição nos panoramas mundial, europeu e nacional

### 1.2.1 – Fundição no mundo

Com um valor de produção superior a 104 milhões de toneladas, em 2016, o setor da fundição apresenta-se como uma indústria de impacto significativo no contexto mundial, a nível económico e energético [9][10].

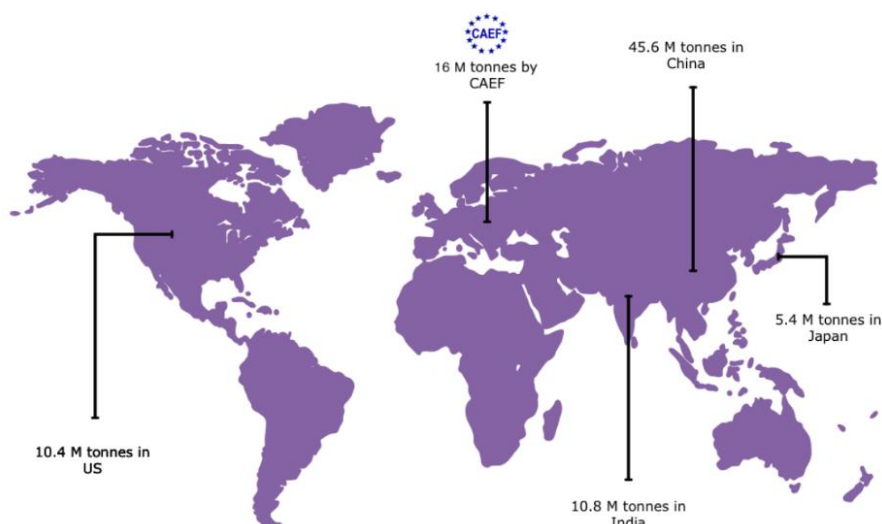
A Tabela 1 apresenta valores de diferentes metais fundidos em 2016, de acordo com a WFO.

*Tabela 1 - Valores mundiais de produção para fundição de diferentes metais. Fonte: Adaptado de [9]*

| Produção mundial anual (milhões de toneladas) |              |                |      |       |          |          |       |                     |       |
|---|--------------|----------------|------|-------|----------|----------|-------|---------------------|-------|
| Ferro cinzento                                | Ferro dúctil | Ferro maleável | Aço  | Cobre | Alumínio | Magnésio | Zinco | Outros não ferrosos | Total |
| 46,2  | 25,5         | 0,82           | 10,7 | 1,9   | 17,9     | 0,32     | 1     | 0,13                | 104,4 |

Os 3 países com valores de produção, associada ao setor da fundição, mais elevados são a China (com 45% do valor global mundial), a Índia e os Estados Unidos [9].

A CAEF é uma organização que lida com questões relacionadas com a fundição, a nível económico, técnico, legal e social. É constituída por associações de fundição de 22 países europeus, entre os quais figura Portugal, com a Associação Portuguesa de Fundição. O contributo da CAEF para os valores globais de produção anual é evidenciado pela Figura 4 e pelo Gráfico 1.



*Figura 4 - Valores de produção anual associada à fundição, em toneladas, em diferentes regiões do globo. Fonte: [10]*

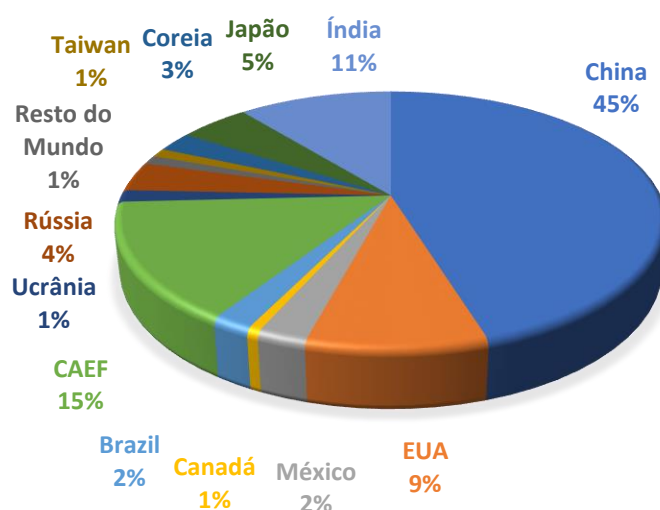


Gráfico 1 - Distribuição mundial dos valores de produção associada à fundição. Fonte: Adaptado de [10]

### 1.2.2 – Fundição no contexto europeu

Atualmente existem cerca de 4700 empresas de fundição de metal na Europa [10].

Apesar de cerca de 70% dessas empresas serem de pequena dimensão (menos de 50 colaboradores), esta indústria disponibiliza um número significativo de postos de trabalho no continente europeu. O setor conta com mais de 290 mil indivíduos a trabalhar em empresas de fundição, recrutando cerca de 20 mil colaboradores por ano, e ainda com mais de 100 mil pessoas com empregos associadas a empresas diretamente relacionadas com a fundição, como fornecedores [10].

O valor de produção europeia associada à indústria da fundição é de cerca de 43 biliões de euros [10].

Na Europa, a fundição de metais ferrosos, como o aço e o ferro, é dominada por países como Alemanha, Turquia, França, Itália, Espanha e Polónia. A produção combinada destas nações corresponde a cerca de 85% do valor global europeu [10].

A fundição de metais não ferrosos, como as ligas de alumínio e zinco, é maioritariamente representada por Alemanha e Itália – 52% do volume total de produção [10].

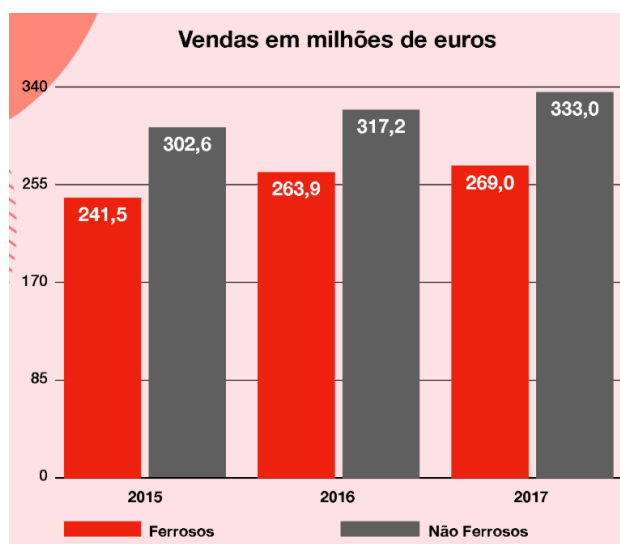
### 1.2.3 – Setor da Fundição em Portugal

Em Portugal, a indústria de fundição tem evidenciado enorme vitalidade, ao conseguir estabelecer o melhor número de sempre nas vendas de fundidos ferros e não ferrosos – 602 milhões de euros (Figura 5) [11].

A distribuição dos valores de produção associados à fundição de metais ferrosos e não ferrosos é evidenciada na Tabela 2.

*Tabela 2 - Fundição de metais ferrosos e não ferrosos em Portugal. Fontes: [12] [13] [14] [15]*

| Tipo de metal | Nº de empresas do setor | Valor de produção anual (ton) |
|---------------|-------------------------|-------------------------------|
| Ferrosos      | 31                      | 54 100                        |
| Não Ferrosos  | 3400                    | 145 000                       |



*Figura 5 - Vendas associadas a fundição em Portugal.  
Fonte: [11]*

A APF é responsável pela produção de mais de 90% de fundidos no país [11]. A evolução da produção atribuída a esta organização, entre 2015 e 2017, é ilustrada pela Figura 6.

A Figura 7 representa as principais áreas de aplicação dos produtos resultantes da fundição em Portugal.



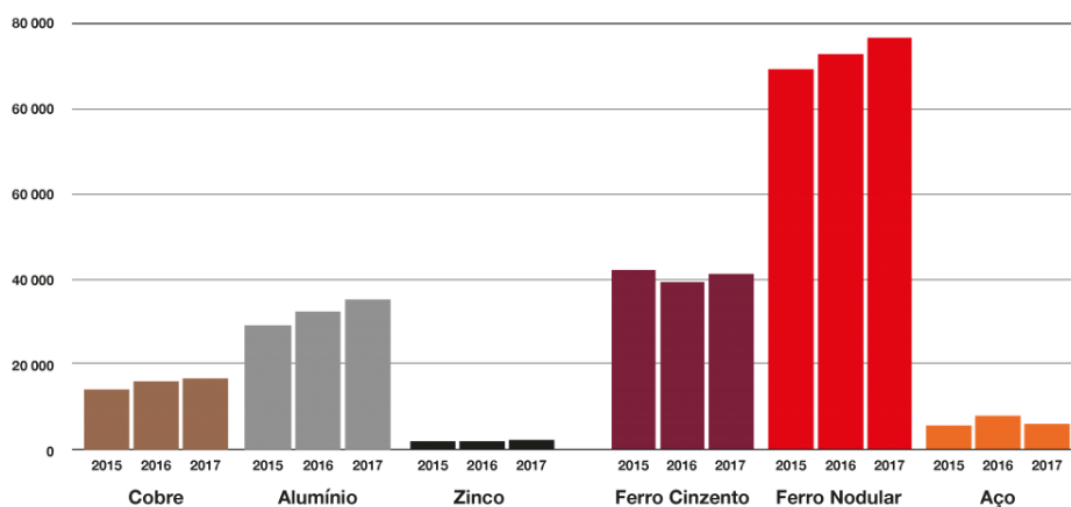


Figura 6 - Evolução da produção, em toneladas, associada a fundição de metais ferrosos e não ferrosos.  
Fonte: [11]

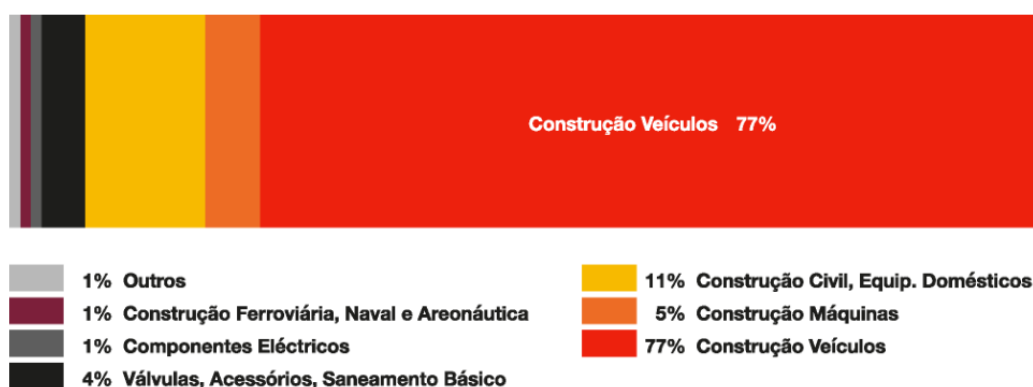


Figura 7 - Principais áreas de aplicação dos produtos de fundição em Portugal. Fonte: [11]

### 1.3 – Consumo de energia e eficiência energética no setor da fundição

#### 1.3.1 – Valores típicos de consumo de energia em fundição

Tipicamente, os processos de fundição são vistos como extremamente exigentes, no que toca às necessidades de energia [16]. A Figura 8 ilustra valores de consumo anual de energia no mercado de fundição dos Estados Unidos – um dos 3 países com as maiores indústrias de fundição [9].

O Reino Unido apresenta um valor de consumo específico de energia, associado à fundição, de cerca de 55 GJ/ton [16].

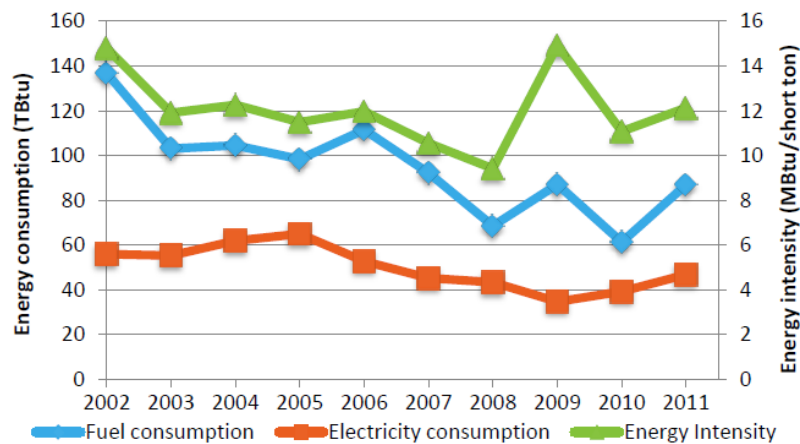


Figura 8 - Consumo de energia e consumo específico de energia no mercado dos E.U.A.  
Fonte: [17]

**Notas:** 1 TBtu = 1055 TJ; Fuel – gás natural e coque

Poupar energia no setor da fundição significa não só economizar grandes quantias monetárias, mas também reduzir significativamente as emissões. No entanto, é importante salientar que esta poupança não depende apenas de aspetos técnicos, estando também fortemente relacionada com a ação humana, nomeadamente ao nível das condições de utilização dos equipamentos e da sua manutenção [16].

Um processo típico de fundição apresenta várias etapas: fusão do material (*melting*), manutenção de temperatura de operação (*holding*), tratamento térmico e/ou químico (*refining*), vazamento do metal para o molde, na vertente de fundição em areia (*casting*), ou alimentação da câmara de injeção e posterior injeção no molde, a alta pressão, na vertente de fundição injetada, remoção do material excedente (*fettling*), maquinaria e acabamento, e, finalmente, controlo de qualidade. Em todas as etapas de fundição (excetuando o controlo de qualidade) existem perdas de material e de energia. No entanto, existem outros processos, como a compressão de ar, que, apesar de não se relacionarem diretamente com a fundição do metal, geram um consumo de energia significativo. Os Gráficos 2 e 3 apresentam, respetivamente, a distribuição típica, segundo o DETR, do consumo e custo de energia associados a diferentes processos, na indústria de fundição [16][18].

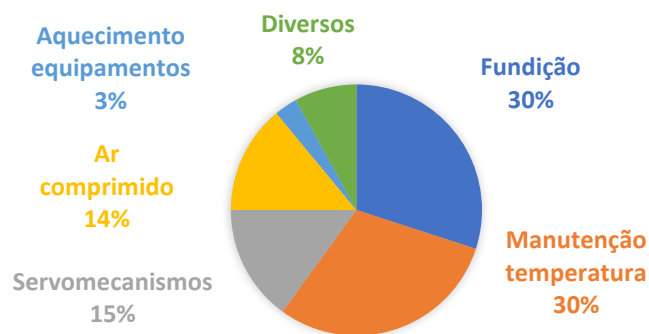


Gráfico 2 - Distribuição típica de consumo energético em fundição. Fonte: Adaptado de [18]



Gráfico 3 - Distribuição típica de custos energéticos em fundição. Fonte: Adaptado de [18]

Em média, a etapa de fundição representa um consumo específico de cerca de 40GJ/ ton [16], constituindo a fase do processo produtivo de maior consumo energético. A fundição de alumínio é um processo de consumo de energia intensivo. O consumo específico desta operação, quando efetuada com recurso a cadinho e gás natural, encontra-se entre 6-17 GJ/ton [16].

No entanto, também o tipo de fundição influencia os consumos envolvidos no processo. Por exemplo, para fundição injetada, o valor de consumo específico na fundição encontra-se entre 26-52 GJ/ton, enquanto que para fundição em areia, este valor se enquadra entre 30-130 GJ/ton [16].

A Figura 9 ilustra as etapas do processo de fundição em areia, onde se verifica que, tipicamente, por cada quilograma de metal processado apenas 0,27 quilogramas correspondem aos parâmetros de qualidade após a fundição (a eficiência do material é de apenas 27%) [16].

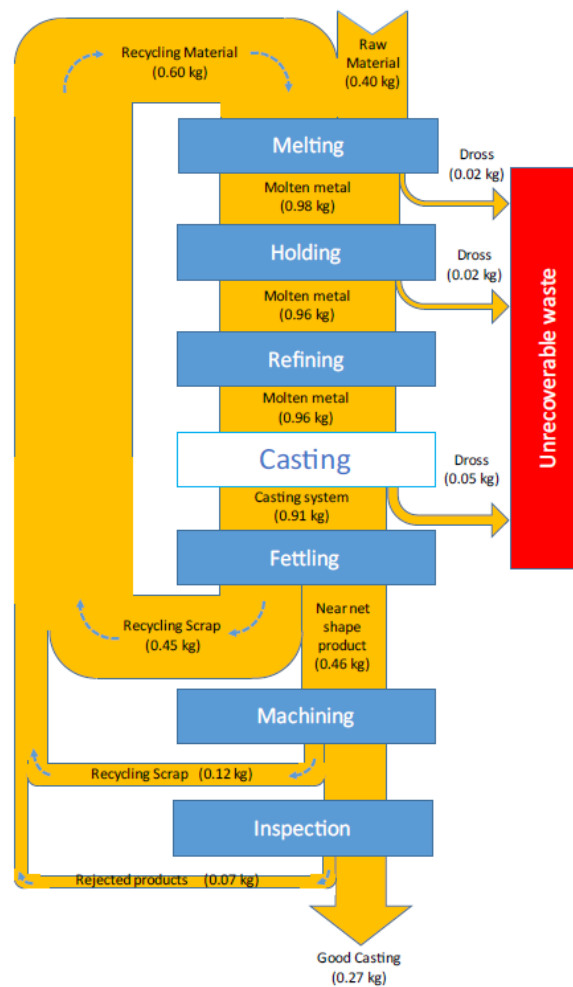


Figura 9 - Perdas de metal no processo de fundição em areia.  
Fonte: [16]

### 1.3.2 – Eficiência energética em fundição

Perante a dimensão do impacto energético até aqui analisado, torna-se evidente a importância do conhecimento, por parte das empresas de fundição, do seu próprio processo produtivo.

É fundamental que se adote uma política de monitorização, extensível a todas as etapas, processos e equipamentos, com vista à máxima eficiência energética, e com consequente redução de consumos, custos e emissões.

Como demonstrado por Salonitis et al. (2016) [18], no processo de fundição em areia, a poupança de energia pode ser alcançada de forma direta, através da redução do consumo de combustível, e de forma direta, através da redução do consumo de material. Assim, a poupança direta ocorre nos processos de fusão do metal e de manutenção de temperatura -responsáveis por

cerca de 50% da energia total envolvida no processo de fundição [16] – e a poupança indireta acontece nos processos de maquinação e de remoção do material excedente.

Algumas medidas de eficiência sugeridas por Salonitis et al. (2016) [18], para este tipo de fundição, vão no sentido da utilização de equipamentos apropriados às características e necessidades do processo, como a capacidade de carga e a potência nominal dos fornos utilizados, economizando energia na fase de fusão de metal.

Outros aspetos salientados pelos autores são a importância da qualidade da matéria prima, a limpeza periódica das câmaras de combustão e a redução do tempo de exposição do material fundido ao ar, de forma a evitar a oxidação do metal ou a incorporação de ar na peça final. Estas medidas contribuem para a obtenção de material fundido “limpo”, o que se reflete na diminuição do consumo de energia associado às fases de tratamento químico e de acabamento superficial.

Os comportamentos até aqui aconselhados são também aplicáveis noutros tipos de fundição, que não em areia.

Finalmente, é enfatizada a necessidade de otimizar o parâmetro *casting yield*, que representa o rácio entre o metal útil, no final do processo de fundição, e a quantidade de metal vazada para dentro do molde [19]. Se este rácio for maximizado, existirá um maior aproveitamento do material fundido “à primeira” e, conseqüentemente, menor necessidade de repetição de processos, para completar a fundição. Assim, torna-se possível economizar na quantidade de metal e na energia associada ao seu processamento.

Noutras vertentes de fundição, como a fundição injetada, existem parâmetros que assumem um papel determinante no processo. A parametrização correta da velocidade dos pistões garante que o enchimento do molde ocorre de forma a evitar, simultaneamente, a incorporação de ar no metal (que ocorreria se o processo fosse demasiado rápido, com escoamento turbulento) e a sua solidificação prematura (que aconteceria se o processo fosse demasiado lento). A velocidade é ainda parametrizada consoante as características geométricas da peça a obter.

A renovação periódica do isolamento dos fornos constitui, para qualquer tipo de fundição, uma medida eficiente de combate às perdas associadas a fenómenos de transferência de calor, como a condução e a convecção através das paredes laterais.

Nas restantes operações, que não se relacionam diretamente com o processo de fundição, existem aspetos que devem ser tidos em conta. O dimensionamento de equipamentos como

máquinas de injeção ou compressores deve ser feito de forma criteriosa, adequando a sua potência nominal e o seu perfil de utilização às necessidades de produção [17].

A correção do fator de potência dos equipamentos, através da instalação de baterias de condensadores, constitui uma boa estratégia para eliminar os custos associados a energia reativa e, conseqüentemente, reduzir o valor da fatura de energia elétrica [17].

Finalmente, é importante proceder a ações de sensibilização dos colaboradores, como formações, ou adquirir políticas internas no sentido da mobilização para a eficiência energética. As condições de operação dos equipamentos devem aproximar-se das ideais e cada colaborador deve proceder à manutenção periódica daqueles que utiliza. Desta forma, torna-se possível eliminar perdas de energia e custos desnecessários.

### 1.4 – Enquadramento e objetivos

O presente documento reporta as atividades realizadas durante um estágio que decorreu entre fevereiro e julho de 2018, nas instalações da empresa Porfic – Fundição Injetada de Portugal, Lda. O projeto ocorreu no âmbito do programa *Galp 21*, protocolo existente entre a Universidade de Aveiro e a Galp Energia, S.A. Os principais objetivos do trabalho consistiram na caracterização da empresa enquanto consumidora de energia, através da sua contextualização com o SGCIE, na realização de estudos de monitorização de equipamentos, com vista à determinação dos principais consumidores de energia e à identificação de pontos prioritários de intervenção e, finalmente, na sugestão de medidas de eficiência energética, com o objetivo de reduzir os valores de consumo, custos e emissões associados ao processo produtivo da empresa.

### 1.5 – Plano de trabalho

A ordem de trabalhos do estágio iniciou-se pelo levantamento energético da empresa. Assim, foi possível reunir toda a informação necessária a nível de consumos e custos associados às duas fontes de energia da Porfic: eletricidade e propano.

De seguida, efetuou-se um inventário dos equipamentos intervenientes no processo produtivo, acompanhado dos respetivos perfis de utilização. Procedeu-se também ao levantamento dos equipamentos de medição de energia da empresa. No caso do sistema de gestão de consumos existente (*Kisense*, no âmbito do programa de eficiência *Galp Energy Manager*), inativo até então, efetuou-se a calibração dos equipamentos necessários, de forma a assegurar o funcionamento total do mesmo.

A monitorização de vários equipamentos, como fornos, máquinas de injeção e compressores, possibilitou a análise energética do processo produtivo da Porfic, através da desagregação de consumos e do cálculo de custos específicos de energia.

Finalmente, foi possível identificar oportunidades de otimização na produção da empresa. Desta forma, procedeu-se à sugestão de implementação de medidas de eficiência energética que promovem a maximização da eficiência de equipamentos e recursos energéticos e a minimização de perdas de energia e custos associados. Foram também levadas em linha de conta oportunidades de financiamento e incentivos que possibilitem a amortização ou o ressarcimento de parte do investimento associado à substituição de equipamentos.

### 1.6 – Estrutura do documento

No primeiro capítulo do documento, para além dos objetivos e do plano de trabalho já apresentados, procede-se a uma revisão bibliográfica, com o objetivo de avaliar a importância e o impacto da gestão de energia na eficiência energética das organizações e no mercado de energia mundial.

Esta revisão permite também o enquadramento do setor da fundição nos panoramas mundial, europeu e nacional. Pretende-se caracterizar o consumo e a eficiência energética neste setor, através da apresentação de valores típicos de consumo de energia e de práticas de eficiência em fundição.

O segundo capítulo constitui a apresentação da empresa onde decorreu o estágio. Aqui realiza-se a análise geral da empresa, que visa o produto, os equipamentos existentes e os serviços disponibilizados, e a análise operacional, que recai sobre o processo produtivo da empresa e sobre as matérias primas utilizadas pela mesma.

O terceiro capítulo consiste na caracterização energética da Porfic. Para o efeito, efetua-se o levantamento energético da empresa e a sua contextualização com o SGCIE, a desagregação de consumos por vetor energético e a identificação das medidas internas de racionalização de energia.

As sugestões de implementação de medidas de eficiência energética figuram no quarto capítulo. Todas elas são acompanhadas de uma breve fundamentação teórica e da metodologia de raciocínio utilizado na realização dos cálculos. Apresenta-se também a estimativa de poupança, energética e económica, e do tempo de retorno de investimento associados a cada medida.

O quinto e último capítulo deste documento é constituído pelas considerações finais. Aqui efetua-se a síntese das oportunidades de melhoria identificadas, bem como das sugestões de medidas a implementar. Procede-se também ao cálculo do tempo de retorno de investimento global, associado à implementação conjunta de todas as medidas de eficiência. Neste capítulo realizam-se ainda sugestões de tarefas futuras, para que a empresa continue a otimizar a eficiência energética do seu processo produtivo.



## 2 – A empresa

O segundo capítulo do relatório consiste na apresentação das instalações onde decorreu o estágio.

Inicialmente, é definida localização da empresa, bem como o setor de mercado em que esta se insere, acompanhada de alguns exemplos de produtos e de áreas de negócio onde os mesmos são aplicados.

Posteriormente, procede-se à síntese das etapas do processo produtivo da empresa, fazendo referência às matérias primas utilizadas no decorrer do mesmo.

### 2.1 – Análise geral da empresa

A Porfic-Fundição Injetada de Portugal, Lda (Figura 10) é uma empresa localizada em Cerca, Maceira, Leiria, com uma área coberta de 4300  $m^2$ , especializada no fabrico de peças em alumínio e zamak, por fundição injetada, de acordo com as necessidades do cliente.

Fundada em 1999, conta com 75 colaboradores e tem sido, ao longo dos anos, distinguida como PME líder, tendo por base as melhores notações de rating e indicadores económico-financeiros [20].

A empresa exporta cerca de 75% da sua produção, estando presente no mercado internacional, em países como França, Bélgica, Alemanha, Finlândia, Espanha e outros. Apresenta um volume de negócios de 4.7 M€ e é certificada, desde 2015, pela norma ISO 9001:2015 [20].

A classificação de atividade económica da empresa em estudo é a CAE 24540 - Fundição de outros metais não ferrosos.



*Figura 10 - Fachada da empresa.*

### 2.1.1 – O Produto e as suas aplicações

A produção da Porfic consiste em peças de alumínio e zamak, recorrendo a fundição injetada. A gama de peças varia entre 2 g e 5 kg, e os lotes produzidos são de pequena, média e grande dimensão.

Os clientes da empresa são provenientes de áreas de negócio distintas [21]. As peças produzidas pela Porfic, ilustradas na amostra da Figura 11, comprovam esta diversidade, figurando em setores de mercado como:

- Iluminação de interiores/exteriores e automóvel (componentes para candeeiros e faróis);
- Indústria do frio (suportes de frigorífico, componentes de segurança, dobradiças);
- Eletrodomésticos (grelhadores, bases para máquinas de fazer crepes, componentes de máquinas de café);
- Construção (diversos componentes mecânicos);
- Telecomunicações;
- Outros.



*Figura 11 - Exemplos de peças produzidas na empresa. Da esquerda para a direita: grelhador, doseador de café, corpo para farol automóvel, corpo para candeeiro interior.*

### 2.1.2 – Equipamentos de produção

A empresa conta com vários tipos de equipamentos, intervenientes nas diferentes fases do processo produtivo, de que são exemplo:

- Os fornos (fusores e de manutenção de temperatura) e máquinas de injeção (câmara fria - alumínio – 315 a 750 ton e câmara quente – zamak - 80 a 250 ton), nas fases de fundição e injeção;
- Os equipamentos de lixagem (manual e automática), furação, roscagem, vibração, granalhadoras e prensas de corte, nas fases de maquinação e acabamento;
- Os CNC's;
- A linha automática de pintura a pó, na fase de acabamento.

### 2.1.3 – Serviços

A nível de serviços, a Porfic fornece apoio ao desenvolvimento de produto e no fabrico de moldes, a partir de desenhos do cliente, e dedica-se à injeção de peças [22].

A empresa realiza também diversos acabamentos e montagens de acordo com as especificações do cliente.

## 2.2 – Análise operacional da empresa

### 2.2.1 – Processo produtivo da empresa

#### O processo de fundição injetada

Fundição injetada, ou fundição sob pressão, pode ser definida como um processo de fundição de material – metal, originalmente no estado sólido, sob a forma de lingotes - que utiliza um molde de aço (matriz), onde o metal líquido é introduzido a alta pressão, após a fundição. Esta técnica é adequada ao fabrico de peças geometricamente complexas, permitindo a obtenção de produtos com excelentes propriedades mecânicas e elevada precisão dimensional [23].

A fase de injeção do processo pode ser classificada consoante o tipo de equipamento utilizado: injeção em câmara quente ou injeção em câmara fria.

Na vertente de injeção em câmara quente (Figura 12), a câmara de injeção encontra-se mergulhada no metal fundido, que repousa no forno. Esta configuração possibilita o rápido enchimento do molde e a redução do arrefecimento do metal.

Estes equipamentos são utilizados para trabalhar ligas com pontos de fusão relativamente baixos, como o caso das ligas de magnésio ou zinco [24]. Na Porfic, existem duas máquinas com sistemas de injeção em câmara quente, que operam ligas de zamak.

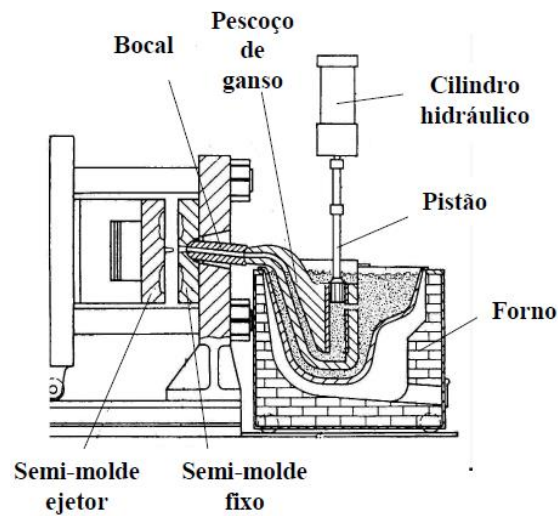


Figura 12 - Representação esquemática do processo de injeção em câmara quente.

Fonte: [24]

Nos sistemas de injeção em câmara fria (Figura 13), o sistema de injeção encontra-se fora do forno, não estando em contacto direto com a liga fundida. Nestes casos, a fusão do metal e a alimentação do sistema de injeção é feita com recurso a equipamentos externos, como se explica mais à frente.

Esta configuração é utilizada em metais com um ponto de fusão superior [24]. Na empresa, este tipo de tecnologia é utilizado nas máquinas de alumínio.

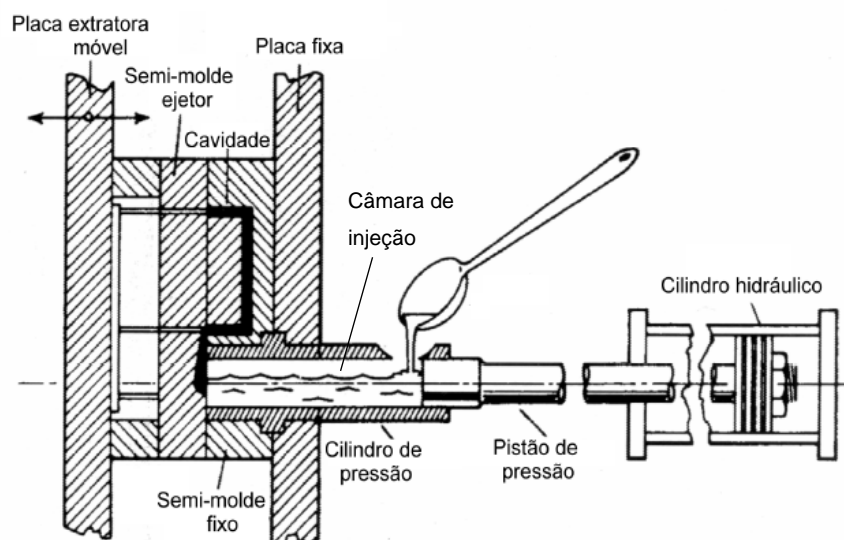


Figura 13 - Representação esquemática do processo de injeção em câmara fria.

Fonte: [24]

### Descrição do processo produtivo

Nesta secção do relatório procede-se a uma breve explicação das várias etapas do processo produtivo da empresa. O fluxograma de processo pode ser consultado no Anexo A.

### Fundição

No arranque do processo de produção, para as ligas de alumínio, os fornos fusores (Figura 14) recebem os lingotes e o aproveitamento do jito, material excedente, procedendo à fusão dos mesmos. A temperatura do metal à saída destes fornos é de cerca de 720°C.

Posteriormente, a chegada do metal ao sistema de injeção faz-se com o auxílio de um cadinho, movimentado por uma ponte rolante. Cada máquina de injeção tem associado um forno (não fusor) individual, responsável por manter a temperatura do material entre 680°C e 700°C. É a partir deste forno que se faz a alimentação da unidade de injeção propriamente dita, por intermédio de uma colher (robot, Figura 15), que deposita o metal fundido na câmara de injeção, no início de cada ciclo do processo.



*Figura 14 - Forno Fusor (FF01).*



*Figura 15 - Alimentação da máquina de injeção.*

No caso do zamak, os lingotes e o jito são depositados diretamente nos fornos associados às máquinas de injeção, sendo estes responsáveis pela fusão e manutenção da temperatura do metal. Nestes equipamentos, a temperatura de operação ronda os 430°C- 470°C.

Desta forma, a fusão da liga e a manutenção da sua temperatura ocorrem no mesmo equipamento e as fases de transporte de metal, através da ponte rolante e de alimentação externa do sistema de injeção, são dispensadas, tornando o processo de fundição mais rápido. A partir daqui o processo decorre de forma idêntica nos dois tipos de metal.

### Injeção

#### 1ª fase

Após a alimentação da câmara de injeção, o pistão, atuado por um sistema hidráulico, começa por se deslocar a baixa velocidade, empurrando o material ao longo da câmara.

Pretende-se que o material chegue o mais depressa possível à entrada do molde para evitar o arrefecimento, mas garantindo um escoamento de regime laminar, sem incorporação de ar no líquido [23]. A velocidade controlada permite a expulsão do ar e gases da câmara de injeção. Esta fase termina quando todo o volume da câmara é ocupado pelo metal líquido.

#### 2ª fase

O material encontra-se na entrada da cavidade do molde e, mais uma vez, pretende-se que o enchimento deste se efetue tão rapidamente quanto possível, para que o material não solidifique prematuramente [23]. No entanto, o processo deve decorrer de forma controlada, para possibilitar a expulsão de todo o ar do interior do molde.

A velocidade do pistão, nesta fase, é determinada pelas características geométricas da peça, como por exemplo a espessura: uma peça com paredes mais finas vai possibilitar trocas de calor mais rápidas entre a superfície do molde, mais fria, e o metal fundido, mais quente. Para compensar esta situação, é expectável que a velocidade do pistão para esta peça seja mais elevada que no caso de uma peça com espessura superior.

De qualquer forma, a velocidade desta fase é sempre superior à da fase anterior. A segunda fase do processo de injeção termina quando o curso do pistão é máximo. Aqui, o impacto do pistão na cavidade do molde faz-se sentir (força de injeção) sinalizando o início da terceira e última fase do processo. A força de injeção é parametrizada de acordo com a peça a obter.

## 3ª fase

Quando o molde se encontra cheio, o material está próximo da sua temperatura de solidificação. Neste momento, é aplicado ao pistão um súbito aumento de pressão, na direção contrária ao seu curso (contra-pressão ou pressão de fecho), compactando o material, com o objetivo de que este solidifique totalmente, sujeito a esta pressão elevada. No final do processo de solidificação do metal, pode ocorrer um fenómeno de contração, que culmina na ocorrência de uma zona vazia, sem material [25] (Figura 16). Assim, a pressão de fecho tem ainda como objetivo assegurar a estanqueidade da peça, fornecendo-lhe uma porção de metal adicional e contrariando eventuais tensões residuais.

Após a solidificação da peça, procede-se à sua remoção do interior do molde. Posteriormente, efetua-se a limpeza do molde e dá-se início a um novo ciclo de injeção.

A Figura 17 representa a sequência de fases do processo de injeção.

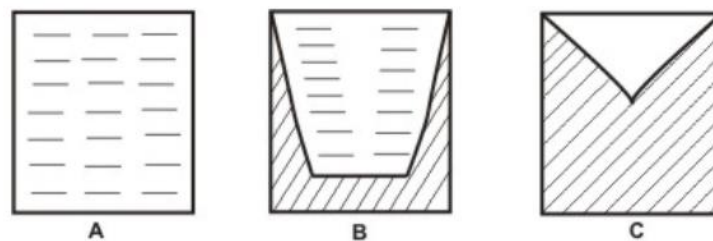


Figura 16 - Processo de solidificação de metal com fenómeno de contração: A – metal no estado líquido; B -solidificação com início na periferia (onde a temperatura é mais baixa) em direção ao centro; C – final da solidificação. Fonte: [25]

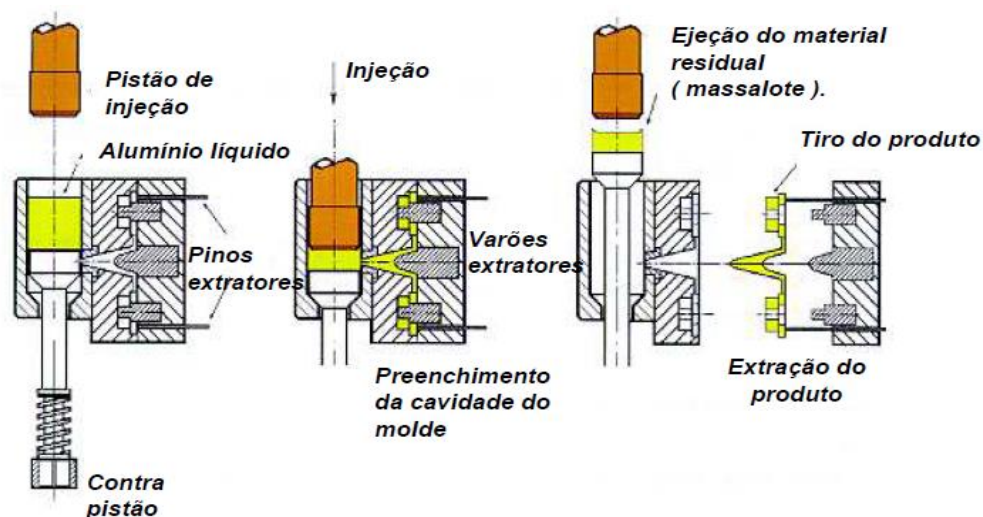


Figura 17 - Processo de fundição injetada. Fonte: [24]

### Moldes utilizados no processo de injeção

O molde, feito em aço (Figura 18) é constituído por duas metades: o molde fixo e o molde móvel. O molde móvel, aberto e fechado através de atuação hidráulica, tem no seu interior cavidades que constituem o negativo da peça a fabricar.

Estas cavidades encontram-se ligadas entre si por canais, através dos quais o material flui durante a fase de enchimento. Após a solidificação do metal, estes canais constituem o jito, que deve ser separado da peça obtida.

No início do processo, à semelhança do que acontece com o metal, os moldes são transportados para o sistema de injeção através das pontes rolantes.



*Figura 18 - Exemplo de molde utilizado na empresa.*

### Lixagem

A primeira das etapas seguintes é a lixagem, onde se procura uniformizar a superfície da peça, de modo a possibilitar a continuidade do processo. Esta operação é feita manualmente nas peças onde o rigor dimensional é alcançável por mão humana (Figura 19), existindo um centro de lixagem automatizado para as peças que exigem maior rigor.



*Figura 19 - Lixas e polidores manuais.*



### Maquinação

É na etapa de maquinação que os detalhes geométricos das peças ganham forma. A secção de maquinação (Figura 20) é essencialmente constituída por furadoras.

Existem também algumas prensas para realizar operações de conformação mecânica e corte ou remoção de material excedente. A maquinação pode ainda ser feita, dependendo das características da peça, nos centros de maquinação CNC existentes na oficina.



*Figura 20 - Equipamentos de maquinação da empresa.*

### Vibração

Seguidamente, ocorre o processo de vibração, onde se efetua a remoção das imperfeições e material excedente, de menor dimensão, que não podem ser eliminados pelas máquinas ou pelos operadores na fase de maquinação.

Para o efeito, recorre-se a máquinas de vibração, nas quais as peças são depositadas. Estas máquinas possibilitam a obtenção de tipos de acabamento distintos através de cones abrasivos ou de um material abrasivo de textura granular, a que se atribui o nome de “palha” (Figura 21). O tipo de acabamento é definido pelos requisitos do cliente.



*Figura 21 - Vibração com recurso a "palha" (à esquerda) e a cones abrasivos (à direita).*

### Granalhagem

A etapa de granalhagem consiste na projeção de um jato de partículas de material abrasivo contra a peça em fabrico, por intermédio de uma granalhadora (Figura 22).

Esta ação remove os contaminantes da superfície, abrindo os poros do material sem o danificar, o que aumenta a sua permeabilidade. Em suma, é um tratamento superficial que, por um lado, remove excedentes e imperfeições, conferindo à peça a geometria desejada e, por outro, vai permitir uma maior permeabilidade à tinta na etapa seguinte.



*Figura 22 – Granalhadora.*

### Pintura

Nesta fase, a peça está pronta a integrar a linha de pintura, para finalização do acabamento. A etapa de pintura tem 3 “sub-etapas” (Figura 23).

No início da etapa de pintura, as peças são remetidas para um túnel de tratamento químico onde, numa primeira fase, são imersas num banho de fosfatização para evitar a oxidação futura e facilitar a aderência da tinta. De seguida, procede-se à lavagem das peças e a secagem das mesmas é realizada por intermédio de jatos de ar quente, na segunda fase do túnel de tratamento.

Posteriormente, as peças seguem para as cabines de pintura, levada a cabo por pistolas pulverizadoras. Aqui, a tinta, em pó, encontra-se sujeita a uma carga eletrostática que cria um efeito íman relativamente à peça, facilitando o processo. Na última etapa do processo de pintura, as peças realizam uma passagem pelo túnel de cozedura, garantindo a secagem da tinta e a sua aderência total ao metal.



*Figura 23 - Linha de pintura da empresa. Da esquerda para a direita: túnel de fosfatização, cabine de pintura e túnel de cozedura.*

### Embalamento e expedição

Terminado o processo produtivo propriamente dito, as peças são remetidas para a secção de embalagem (Figura 24), onde são agrupadas consoante o tipo, cliente ou encomenda. É feita uma análise final das peças, de forma a evitar anomalias ou defeitos, e procede-se ao seu embalamento e posterior transporte para a sala de expedição.



*Figura 24 - Secção de embalagem.*

#### 2.2.1 – Matérias-primas utilizadas e materiais reciclados no processo produtivo

Como foi referido anteriormente, as matérias primas utilizadas pela Porfic são o alumínio e o zamak, sob a forma de ligas.

##### Zamak

O zamak é uma liga metálica composta por 4 elementos que estão na origem do seu nome: Zinco, Alumínio, Magnésio e Cobre (do alemão *Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer*).

Das várias ligas zamak existentes, as mais utilizadas em fundição injetada são as zamak 2, 3 e 5. Na empresa, cerca de 90% das ligas são do tipo 5, sendo as restantes do tipo 3. O tipo de liga depende da funcionalidade da peça a obter e é especificado pelo cliente na altura da encomenda. No Anexo B podem ser consultadas tabelas comparativas dos 3 tipos de liga, a nível de propriedades mecânicas e composição química.

### Alumínio

A Porfic utiliza, de momento, 3 tipos de liga de alumínio distintos. São eles a liga *AlSi10Mg*, na norma europeia designada por *EN 43400*, a liga *AlSi12 (Fe)*, *EN 44300*, e a liga *AlSi9Cu3 (Fe)*, denominada *EN 4600*.

As diferenças entre as propriedades dos diferentes tipos de liga de alumínio figuram também no Anexo B.

A utilização de ligas de alumínio e zamak confere excelentes propriedades mecânicas às peças produzidas pela empresa. Delas são exemplo a elevada resistência mecânica, a resistência à corrosão e ao desgaste, propriedades úteis em aplicações onde as peças se encontrem sujeitas a esforços mecânicos (ex: componentes para construção), e uma excelente condutibilidade térmica, útil nos grelhadores, máquinas de crepes, etc. Além disso, o custo do processo produtivo é relativamente baixo.

### Materiais Reciclados

Conforme mencionado anteriormente, o metal excedente do processo de injeção – denominado jito - é removido nas etapas de maquinação e granalhagem.

Com o objetivo de adotar a ideologia de uma economia circular e maximizar o aproveitamento do material, o jito é reintroduzido no processo produtivo, na fase de fundição de liga, no início de cada ciclo.

### 3 – Matriz energética da empresa

O conteúdo deste capítulo consiste na avaliação do contexto da empresa a nível energético. Numa primeira fase, procede-se ao enquadramento da Porfic no SGCIE, de forma a aferir se a empresa se apresenta como instalação consumidora intensiva de energia.

Em seguida, efetua-se a desagregação de consumos energéticos associados aos equipamentos da Porfic, por vetor energético, com o objetivo de identificar os principais consumidores e potenciais pontos de intervenção.

Analisou-se também a política da empresa relativamente à eficiência energética, nomeadamente ao nível de sistemas, práticas e ações de sensibilização interna orientados para a poupança de energia.

#### 3.1 – Caracterização da situação energética da empresa

##### 3.1.1 – Levantamento energético

O plano de atividades do estágio iniciou-se com o levantamento energético da empresa (Tabela 3). Para o efeito, recorreu-se às faturas de energia elétrica e aos registos de consumo de gás propano. Todos os documentos são referentes ao ano de 2017.

A partir da informação obtida, foi possível proceder ao tratamento de dados, sob a forma de gráficos e tabelas relativos aos consumos energéticos totais anuais. As tabelas detalhadas estão presentes no Anexo C.

*Tabela 3 - Levantamento energético da empresa (ano de 2017).*

| <b>Tipo de Energia</b> | <b>tep</b> | <b>MWh</b>   | <b>tonCO<sub>2</sub>e</b> | <b>Custo de energia (€)</b> |
|------------------------|------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| Eletricidade           | 283        | 1 314        | 618                       | 198 597                     |
| Propano                | 460        | 5 338        | 1 214                     | 369 437                     |
| <b>Total</b>           | <b>743</b> | <b>6 652</b> | <b>1 832</b>              | <b>568 034</b>              |

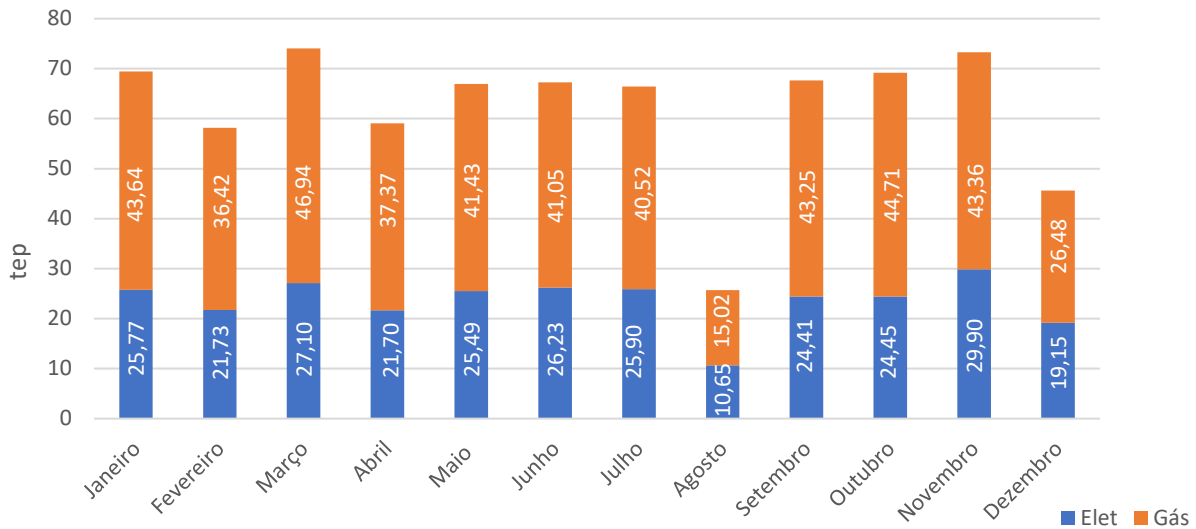


Gráfico 4 - Distribuição mensal do consumo de energia da empresa.

Tabela 4 - Indicadores energéticos (ano de 2017).

| IE (kgep/€) | CEE (kgep/ton) | IC (tonCO <sub>2</sub> e/tep) |
|-------------|----------------|-------------------------------|
| 1,52        | 860,93         | 2,47                          |

O cálculo dos indicadores energéticos da empresa (Tabela 4) teve como base a informação disponível na página da ADENE referente ao SGCIE [26], fundamentada pelo despacho nº17313/2008 de 26 de junho [27].

Através da análise dos dados apresentados, conclui-se que o propano se assume como o recurso energético de maior impacto no contexto energético da empresa, representando cerca de 60% e 65% do consumo e custo anuais, respetivamente.

As conversões necessárias foram realizadas com recurso à tabela de fatores de conversão também presente no Anexo C, elaborada em conformidade com o despacho nº17313/2008 de 26 de junho [27]. No caso do propano, foi tida em conta a variação da densidade do mesmo com a pressão de serviço (Anexo D) e o seu poder calorífico (PCI).

### 3.1.2 – Contextualização com a legislação (SGCIE)

O SGCIE estabelece o valor de 500 tep anuais como limite inferior para que uma empresa seja consumidora intensiva de energia. Analisando a Tabela 3, verifica-se que o valor 743 tep/ano é superior ao limite apresentado, pelo que a Porfic incorre nessa situação.

Com este valor de consumo total de energia, a empresa integra o escalão correspondente ao intervalo [500-1000 tep]. Assim, encontra-se abrangida pelo SGCIE, segundo o Decreto lei nº71/2008 de 15 de abril [28], e deve declarar-se como instalação CIE, adotando o seguinte procedimento:

- Proceder ao registo das instalações no site da ADENE;
- Realizar auditorias energéticas de 8 em 8 anos;
- Elaborar e entregar o PREn, num prazo de 4 meses após a 1ª auditoria;
- Entregar o REP a cada dois anos, reportando o estado de implementação do PREn.

O PREn exige, para este escalão:

- A implementação, nos primeiros 3 anos, de todas as medidas de eficiência energética com *payback* inferior a 3 anos;
- Uma melhoria anual de 4%, em 8 anos, do valor dos indicadores de intensidade energética, IE, e de consumo específico de energia, CE.
- A manutenção, no mínimo, do valor do indicador de intensidade carbónica, IC .

Uma vez entregue e aprovado, o PREn passa a designar-se ARCE.

É da responsabilidade da empresa executar e cumprir o acordo e elaborar relatórios de progresso, a cada 2 anos de vigência do acordo. Estes documentos devem conter a análise e impacto das medidas implementadas, eventuais desvios e sugestão de medidas corretivas.

#### 3.1.3 - Oportunidades de financiamento e incentivos

Existem incentivos e ressarcimentos para as instalações consumidoras intensivas de energia que cumpram de forma positiva o acordo, bem como penalizações para aquelas que não vão de encontro às metas estipuladas [29].

Para o intervalo de consumo [500-1000 tep] registado na empresa, estão disponíveis as seguintes medidas:

- Ressarcimento de 25% dos investimentos realizados em equipamentos e sistemas de gestão e monitorização dos consumos de energia até ao limite de 10 000€;
- Isenção do ISP: gases de petróleo, quando usados como combustível (propano, no contexto da empresa) - 7,99€ por cada 1000kg.

Atualmente, encontra-se em implementação a 6ª edição do PPEC, que tem como objetivo apoiar financeiramente iniciativas que promovam a eficiência e redução do consumo de eletricidade nos diferentes segmentos de consumidores [30]. Esta iniciativa é da responsabilidade da ERSE e da DGEG e as medidas relativas a este plano serão implementadas por 33 empresas promotoras, tais como a Galp, Iberdrola, ADENE, EDP, etc.

Existem medidas de aplicação em equipamentos de interesse para a Porfic, nomeadamente a nível de motores (VEV e motores de alto rendimento), sistemas de ar comprimido (soluções de eficiência energética), gestão de consumos e de perfis de carga, ou iluminação (fornecimento de sistemas de iluminação eficientes). Todas as ações de eficiência apresentam um prazo de implementação até dezembro de 2019 [30].

### 3.1.4 - Penalidades

As penalidades de não cumprimento do ARCE são ilustradas pela Figura 25 .

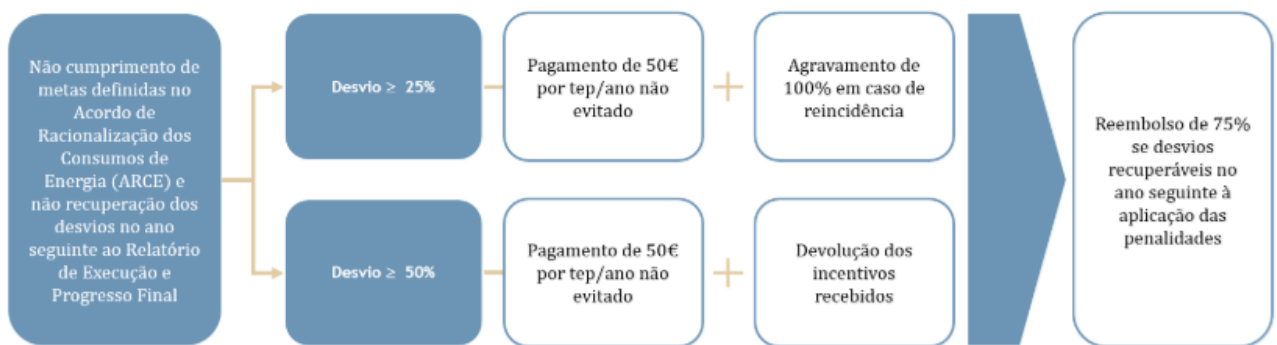


Figura 25 - Penalidades de não cumprimento das metas definidas no ARCE. Fonte: [26]

### 3.2 – Desagregação dos consumos da empresa por vetor energético

O passo seguinte consistiu na desagregação dos consumos energéticos, tendo sido necessário proceder ao levantamento de todos os equipamentos térmicos (queimadores e fornos), relacionados com o consumo de gás e de todas as máquinas associadas ao consumo de energia elétrica. Efetuou-se também o levantamento dos equipamentos de iluminação.

Nesta secção apresenta-se o estudo dos consumos e custos específicos dos equipamentos consoante o tipo de recurso energético, numa base anual, de forma individual, por grupo ou por pavilhão/sala. Esta análise é concretizada sob a forma de tabelas síntese, relativas a consumos e custos totais, e respetivos gráficos.



No Anexo C, encontram-se as tabelas detalhadas com as informações dos equipamentos, tais como as designações, especificações técnicas, consumos individuais, horários de funcionamento, valores de potência média em funcionamento, etc. Neste ficheiro constam 3 folhas relativas a queimadores, máquinas e iluminação, com a respetiva designação.

Para toda a desagregação (exceto em casos de equipamentos específicos, devidamente registados nas tabelas) considerou-se que a empresa opera 5 dias por semana, num total de 48 semanas por ano, encontrando-se inativa no mês de agosto.

A Tabela 5 apresenta os valores de custo específico utilizados na desagregação de consumos, para cada fonte de energia.

*Tabela 5 - Custo associado a cada vetor energético.*

| Eletricidade (€/kWh) | Propano (€/ton) |
|----------------------|-----------------|
| 0,12                 | 900             |

O valor médio utilizado para a tarifa de energia elétrica foi obtido a partir das faturas da empresa, relativas ao ano de 2017.

Na aferição do custo específico de propano, foi necessário considerar o contrato firmado entre o distribuidor, Galp, e o cliente, Porfic, no sentido de apurar as condições a que o mesmo está sujeito. Concluiu-se que o valor de custo por tonelada de propano não se mantém constante e, dessa forma, utilizou-se um valor que corresponde à média do custo específico deste recurso, desde a celebração do referido contrato.

### 3.2.1 – Energia elétrica

#### a) Iluminação

O primeiro estudo ocorreu ao nível dos consumos de energia elétrica associados a iluminação. Efetuou-se, então, o levantamento de todos os equipamentos de iluminação, considerando as suas especificações técnicas, como a potência nominal, o tipo de luminária e respetivos horários de funcionamento.

*Tabela 6 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a iluminação.*

| MWh | tep | tonCO <sub>2</sub> e | Custo de energia elétrica (€) |
|-----|-----|----------------------|-------------------------------|
| 32  | 7   | 15                   | 3 757                         |

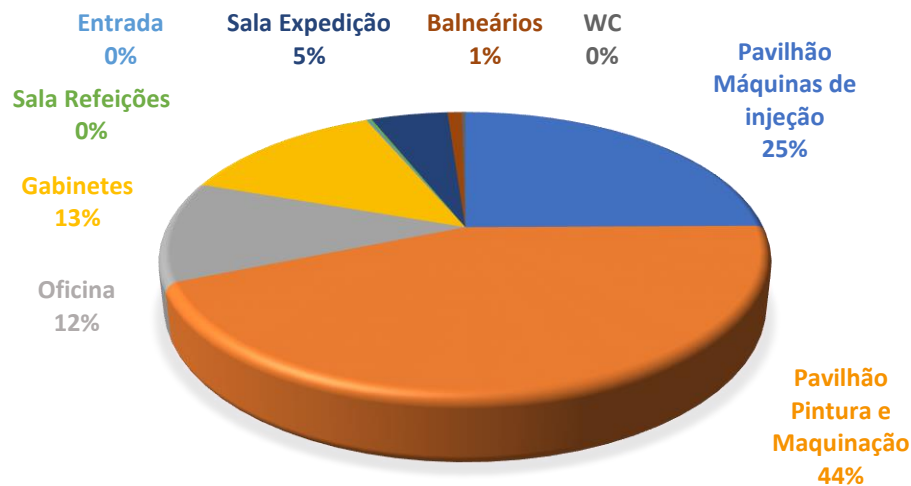


Gráfico 5 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a iluminação.

O consumo elétrico de cada equipamento foi calculado a partir da equação seguinte:

$$\text{Consumo anual (kWh)} = P_{\text{instalada}} * n^{\circ} \text{ salas} * n^{\circ} \text{ horas de funcionamento anuais} \quad (3.1)$$

Os valores de potência englobam já o balastro de 20% [31], no caso das lâmpadas fluorescentes, e “*nº salas*” refere-se ao número de espaços do mesmo tipo. Analisando a informação obtida, conclui-se que os principais consumos de energia elétrica, a nível de iluminação, ocorrem nos pavilhões das máquinas de injeção/fornos e de maquinaria/pintura. Este resultado seria expectável, uma vez que estes são os setores que mais horas operam.

Em oposição, os locais com menor horário de funcionamento, tais como os WC’s, corredor de entrada ou sala de refeições, apresentam um contributo praticamente nulo para o consumo total de energia elétrica associado à iluminação.

Entre os dois setores de maior consumo, destaca-se o de maquinaria e pintura, com um valor de aproximadamente 45% do consumo total. Este facto pode ser explicado pelo elevado número de horas de funcionamento do setor (8h-22h na pintura e lixagem, por exemplo) e ainda pela existência de vários dispositivos de iluminação local em espaços como os postos de maquinaria, o centro de lixagem automático ou as cabines de pintura, adicionais à iluminação geral do pavilhão (luminárias do teto).

## b) Máquinas

A segunda etapa de desagregação consistiu na aferição dos consumos de energia elétrica associados aos fornos elétricos e à força motriz utilizada nas máquinas. Assim, esta análise recai sobre equipamentos como os referidos fornos e as máquinas intervenientes no processo produtivo, de que são exemplo as máquinas de injeção, furadoras, prensas, CNC's, compressores, etc.

Tabela 7 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a fornos elétricos e à força motriz utilizada pelos equipamentos.

| MWh   | tep | tonCO <sub>2</sub> e | Custo de energia elétrica (€) |
|-------|-----|----------------------|-------------------------------|
| 1 302 | 280 | 612                  | 156 243                       |

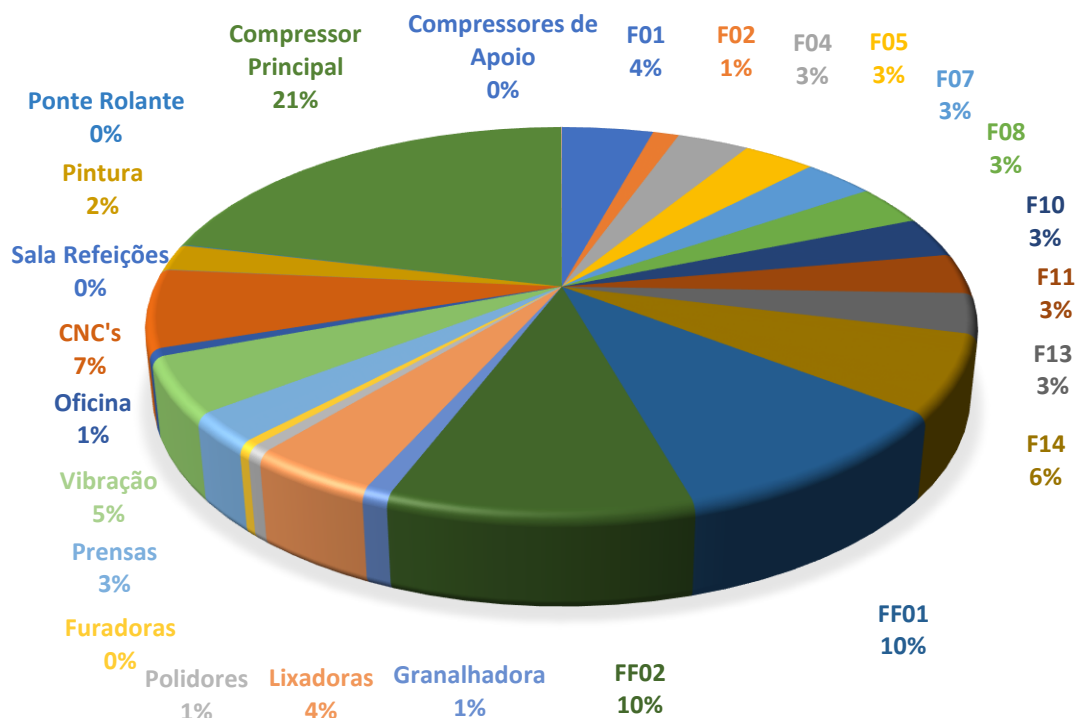


Gráfico 6 - Desagregação do consumo de energia elétrica associado a fornos elétricos e à força motriz utilizada pelos equipamentos.

A expressão utilizada para estimar o consumo de eletricidade associado aos equipamentos foi a Equação 3.2. A potência média de funcionamento de cada máquina foi determinada através de um analisador de energia, instalado nos respetivos quadros elétricos.

$$\text{Consumo anual (kWh)} = P_{\text{média}} * n^{\circ}\text{horas anuais de funcionamento} \quad (3.2)$$

Através da análise do Gráfico 6, verifica-se que o grupo de maior impacto é o das máquinas de injeção, o que se justifica pelo número de componentes elétricos destes equipamentos e pelos seus elevados valores de potência média, durante as diversas horas de funcionamento.

A segunda maior “fatia” é atribuída ao ar comprimido, o que evidencia a elevada componente pneumática da atividade da empresa. O equipamento responsável por este consumo é essencialmente o compressor principal, de elevada potência, que opera continuamente para suprimir as necessidades de ar comprimido que ocorrem nas fases de injeção (pistolas desmoldantes, para limpeza dos moldes) de pintura (ao nível dos jatos de ar quente, na secagem e na pulverização da tinta), nos sistemas de segurança, abertura e fecho de portas nos CNC’s, nas prensas pneumáticas, entre outras.

### 3.2.2 – Propano

A última análise incidiu sobre os consumos energéticos associados a gás propano. A empresa dispõe de queimadores em diversas fases do processo produtivo: na fundição das ligas, através dos fornos fusores, na manutenção da temperatura de operação do metal, nos fornos associados aos sistemas de injeção (não fusores) e na fase de pintura, mais especificamente no aquecimento do banho de tratamento químico, na secagem e na cozedura das peças.

Tabela 8 - Desagregação do consumo de propano.

| MWh  | tep | tonCO <sub>2</sub> e | ton propano | Custo de propano (€) |
|------|-----|----------------------|-------------|----------------------|
| 5334 | 460 | 1213                 | 416         | 374 073              |

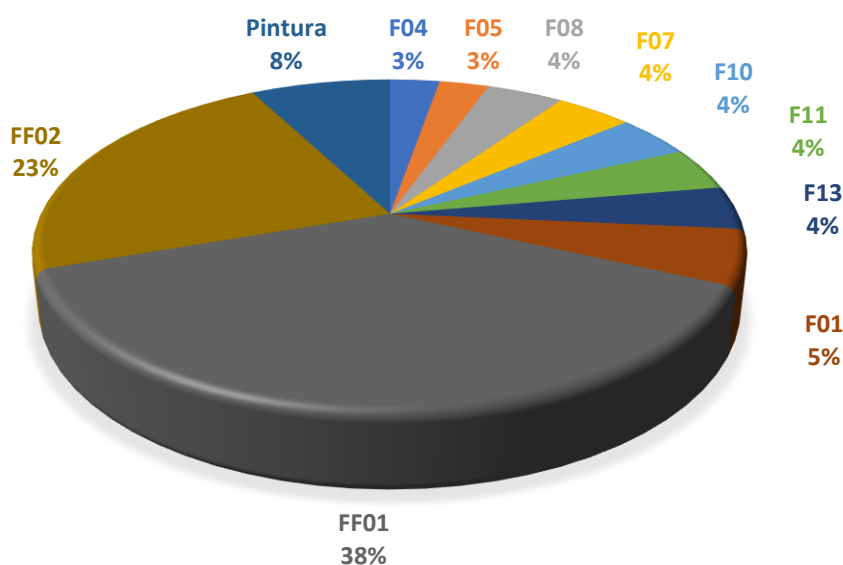


Gráfico 7 - Desagregação do consumo de propano.

O consumo de cada equipamento foi calculado a partir da combinação das equações 3.2 e 3.3.

$$P_{média}(kW) = \frac{m_{propano} * PCI_{propano}}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Para a aferição do valor de potência média dos queimadores, foram consideradas as leituras do volume de propano consumido, num dado intervalo de tempo. Posteriormente, recorrendo à densidade, calculou-se a massa de propano correspondente e a energia envolvida no processo, obtendo-se o resultado final a partir da Equação 3.3.

Analisando a distribuição obtida, conclui-se que os maiores valores de consumo são atribuídos aos fornos fusores. Esta situação deve-se ao facto de estes fornos operarem continuamente, durante todo o ano fabril, apresentando um valor de potência nominal (e de potência média de funcionamento) muito superior relativamente aos restantes queimadores. O forno fusor FF01 apresenta-se como o maior consumidor de energia da empresa. Por esse motivo, este forno foi alvo de uma monitorização mais profunda que permitiu o estudo de aspetos como o seu perfil de funcionamento, o seu rendimento e o custo específico de alumínio a si associado. Todos estes dados figuram em anexo e foram aplicados na fase de sugestão de implementação de medidas, que se apresenta mais à frente.

### 3.3 – Zamak e Alumínio na Porfic: Consumo energético e custos associados

Esta secção tem como principal objetivo desagregar a produção propriamente dita (fundição + injeção) de peças em alumínio e em zamak. Para essa finalidade, e partindo da desagregação de consumos já efetuada, realizou-se um estudo que incidiu sobre os equipamentos, consumos e custos associados a cada tipo de material. Na análise de consumo de propano foram considerados os fornos a gás e para a energia elétrica levou-se em linha de conta os fornos elétricos e a força motriz de todas máquinas de injeção.

*Tabela 9 - Dados relativos a fundição e injeção de zamak e alumínio, na empresa.*

| <b>Metal</b> | <b>Produção 2017<br/>(ton)</b> | <b>Preço material<br/>(€/kg)</b> | <b>Consumo de<br/>energia (tep)</b> | <b>Custo de energia<br/>+ metal (€)</b> |
|--------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| Zamak        | 205,13                         | 3,2                              | 41                                  | 685 177                                 |
| Alumínio     | 657,49                         | 2,05                             | 541                                 | 1 751 785                               |

Como demonstrado pela Tabela 9, a produção assenta essencialmente em peças de alumínio. A empresa produz, maioritariamente, peças destinadas à indústria automóvel e de eletrodomésticos, que apresentam dimensões superiores. Como as ligas de alumínio apresentam uma densidade inferior ao zamak, originam componentes mais leves e, consequentemente, mais práticos do ponto de vista de fatores como o transporte, montagem, etc. Esta é a razão principal pela qual ocorre a discrepância verificada.

O consumo de propano é praticamente atribuído na totalidade aos equipamentos produtores de alumínio, que se justifica pela superioridade do seu número em comparação com os equipamentos de zamak.

Relativamente à eletricidade, a distribuição dos consumos é ligeiramente distinta da anterior, devido à existência de alguns fornos totalmente elétricos, para ambos os metais. No entanto, uma vez que esta análise contabiliza também a componente elétrica associada aos sistemas de injeção (existente também em máquinas de propano), os valores de consumo de energia elétrica encontram-se, mais uma vez, associados na sua maioria a equipamentos de alumínio.

O Gráfico 8 pretende ilustrar a disparidade entre os valores de custo total de produção de alumínio e zamak, levando em linha de conta o custo de energia envolvida nos processos de fundição e injeção de metal.

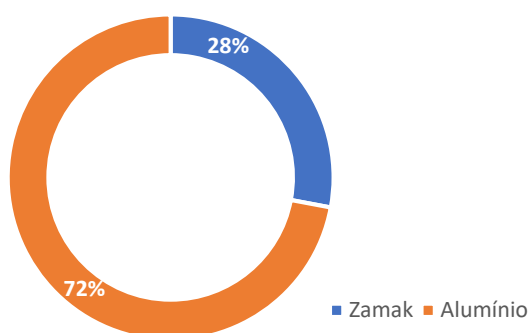


Gráfico 8 - Custo de energia e metal para zamak e alumínio.

#### 3.4 - Racionalização de energia na empresa: Medidas de sensibilização interna

A nível de política de sensibilização interna, a Porfic aposta, ocasionalmente, em palestras, destinadas aos seus funcionários, com o objetivo de enfatizar a importância da energia. Com estas iniciativas, a empresa procura garantir que os seus colaboradores utilizem os equipamentos em condições próximas das ideais, efetuando uma gestão correta dos recursos energéticos.

A Porfic dispõe também de um *software* de racionalização de consumos, *Kisense*, no âmbito do programa nacional de eficiência energética *Galp Energy Manager*. Este programa tem como objetivo dotar as empresas de ferramentas de monitorização, gestão e controlo, que lhes permitam otimizar os seus consumos de eletricidade e reduzir os seus custos de energia [32]. Assim, através de extensores de rede, presentes nos contadores de energia, a empresa estabelece comunicação com o servidor Galp, que, através do referido *software*, recebe informações dos valores de consumo, possibilitando a monitorização dos mesmos e a identificação de oportunidades de racionalização. Até à data deste estágio, esta comunicação encontrava-se limitada, tendo-se procedido, no decorrer do mesmo, à configuração dos equipamentos necessários ao funcionamento total do sistema.





## 4 – Medidas de eficiência energética: Sugestões de implementação e estimativa de poupanças

Este capítulo do relatório consiste na sugestão de medidas de eficiência energética, motivadas pelas oportunidades de intervenção identificadas nas etapas anteriores do estágio.

Procede-se à apresentação de uma medida por subcapítulo, procurando estabelecer um contraste entre a situação inicial e o momento da intervenção através da quantificação dos valores de poupança, energética e monetária, e de investimento, quando aplicável, associados às ações corretivas.

### 4.1 – Aquisição de uma bateria de condensadores

Uma das primeiras etapas do estágio consistiu na consulta das faturas de energia elétrica da empresa. Nesse momento, foi possível constatar que a Porfic apresenta, mensalmente, custos associados a energia reativa consideravelmente elevados.

Ao contrário da energia ativa, necessária para produzir trabalho, a energia reativa está associada à produção do fluxo magnético, indispensável ao funcionamento dos motores. Assim, este tipo de energia não é útil, mas ocupa “espaço”, aumentando as perdas e diminuindo o rendimento, com custos associados [33] [34] [35].

A Figura 26 estabelece as relações trigonométricas entre os vetores de potência ativa, reativa e aparente.

A potência ativa é suscetível de ser transformada em potência útil, permitindo a realização de trabalho. Corresponde ao produto entre os valores eficazes de tensão, corrente e o valor de  $\cos(\Phi)$  [36][37].

A potência reativa encontra-se relacionada com a produção do fluxo magnético necessário ao funcionamento dos motores, não sendo transformada em potência útil nem trabalho. É da pelo produto entre os valores eficazes de tensão, corrente e o valor de  $\sin(\Phi)$  [36][37].

A potência aparente representa a combinação entre a potência ativa e reativa, sendo obtida pelo produto entre os valores eficazes de tensão e corrente [36][37].

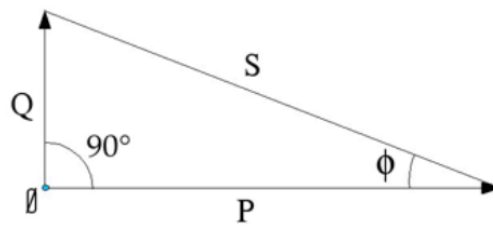


Figura 26 - Configuração trigonométrica entre potência ativa (P), reativa (Q) e aparente (S). Fonte: [36]

Com o objetivo de eliminar os referidos custos, sugere-se a correção do fator de potência. Este fator, dado por  $\cos(\phi)$ , representa a fração de energia elétrica que é transformada em trabalho ou, de outra forma, o quociente entre potência ativa e potência aparente. O fator de potência pode ser estudado através do valor de  $\tan(\phi)$ , que traduz a relação entre energia reativa e energia ativa, de acordo com a Equação 4.1 [36]. Quanto maior é o valor de  $\tan(\phi)$ , menor é o fator de potência e maior é o valor de energia reativa a transitar na rede, o que traduz uma utilização de energia elétrica pouco eficiente. Assim, corrigir o fator de potência significa diminuir o valor do ângulo  $\phi$ , que representa o desfasamento entre a tensão e a corrente (Figura 27), responsável pelas desvantagens anteriormente mencionadas [33] [36].

$$\tan(\phi) = \frac{E_{reativa}}{E_{ativa \text{ (horas de cheio e ponta)}}} \quad (4.1)$$

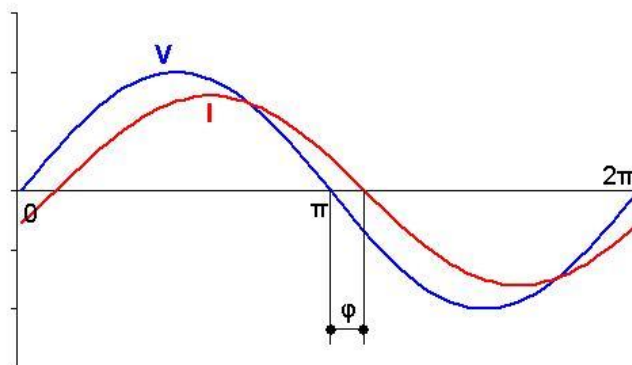


Figura 27 - Avanço da tensão (V) relativamente à corrente (I). Fonte: [38]

A referida correção pode ser conseguida através da aquisição e instalação de uma bateria de condensadores (Figura 28).

Esta bateria apresentará uma potência reativa de sinal contrário ao daquela que se encontra associada ao funcionamento dos equipamentos, sendo responsável pela geração de uma onda que vai anular o desfasamento anteriormente verificado, bem como o efeito indutivo associado às cargas existentes na rede.

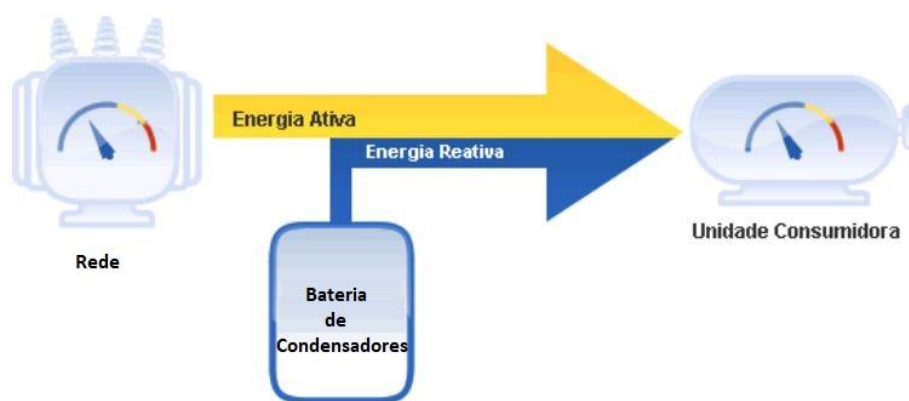


Figura 28 - Esquema representativo da utilização de energia reativa com e sem condensador.  
Fonte: Adaptado de [39]

Assim, para além da redução da fatura energética, da melhoria da estabilidade da rede interna e do prolongamento do tempo de vida útil dos equipamentos, a compensação do fator de potência maximiza ainda o rendimento da potência instalada na empresa [33] [35].

Finalmente, apresenta-se a proposta de dimensionamento de uma bateria de condensadores adequada às necessidades de produção da Porfic.

Nas equações que se seguem,  $Q$  representa potência reativa e  $\phi$  o desfasamento entre tensão e corrente. Os índices 1 e 2 referem-se, respetivamente, à totalidade de energia reativa existente e à percentagem de energia reativa (30%) que a empresa pode injetar na rede, gratuitamente. As regras de faturação de energia reativa podem ser consultadas no despacho nº7253/2010 [40].

A potência reativa da bateria é dada por  $Q_c$ , através da equação 4.2 [36]:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \text{ (kvar)} \quad (4.2)$$

Os valores de  $Q_1$  e  $Q_2$  podem ser determinados a partir das seguintes relações [36]:

$$Q_1 = P_{tomada} * \tan(\phi_1) \text{ (kvar)} \quad (4.3)$$

$$Q_2 = P_{tomada} * \tan(\phi_2) \text{ (kvar)} \quad (4.4)$$

As faturas de energia elétrica contêm os valores mensais de potência tomada e de  $\cos(\phi_1)$ . Sendo  $\phi_2$  um valor constante ( $16,69^\circ$ ) [36], torna-se então possível determinar, para cada mês, o valor de potência reativa a debitar pela bateria.

No Anexo E apresenta-se a tabela detalhada desta proposta, contendo informação relativa à faturação de energia reativa na empresa.

Analisando a referida tabela, verifica-se que o valor mais elevado de potência reativa, relativo ao ano de 2017, se fixa nos 87,34 kvar. Sugere-se então a aquisição de uma bateria de 99 kvar, com o objetivo de garantir a cobertura das necessidades energéticas associadas à produção da empresa.

A Tabela 10 sintetiza, de acordo com o gerador de preços [41], o investimento associado à referida bateria. Realizou-se também a previsão do tempo de retorno de investimento - Tabela 11 - considerando a poupança anual de custos em energia reativa.

*Tabela 10 - Investimento associado à bateria de condensadores. Fonte: [41]*

| Bateria | Custos Adicionais |
|---------|-------------------|
| 2 540€  | 60€               |
| 2 600€  |                   |

*Tabela 11 - Poupança e tempo de retorno de investimento.*

| Poupança Anual | Payback (anos) |
|----------------|----------------|
| 4 840€         | 0,5            |

## 4.2 – Substituição do compressor de velocidade fixa (carga-vazio) por um compressor com VEV

Na secção de desagregação de consumos associados às máquinas, verificou-se que o ar comprimido apresenta um impacto significativo no valor final de consumo de energia, sendo vários os equipamentos da empresa com elevada componente pneumática.

Com um regime praticamente contínuo, o compressor principal representa cerca de 20% do consumo de energia elétrica da empresa (Secção 3.2.3 - Gráfico 6). Logicamente, este equipamento constitui um ponto prioritário de intervenção e as medidas tomadas nesse sentido são descritas em seguida.

Até ao momento deste estágio, a Porfic possuía um compressor sem variador de velocidade. Este tipo de compressor apresenta um funcionamento de carga-vazio, operando entre dois pontos de pressão programados. Quando a pressão atinge o seu valor máximo, o compressor deixa de comprimir o ar e mantém o sistema em vazio, até que seja necessário entrar novamente em compressão – momento em que se regista o valor mínimo de pressão. Durante o período de vazio, o compressor pode consumir até cerca de 25% da energia consumida em carga [31].

Os compressores com variador de velocidade adaptam a sua capacidade ao perfil de consumo de ar comprimido. Estes equipamentos possuem um inversor (também denominado regulador de frequência) que regula a velocidade do seu motor, de forma proporcional à frequência, consoante as necessidades de ar comprimido/produção. Desta forma, consegue-se uma poupança de energia significativa (20%-50%) num regime de funcionamento mais suave e constante, que se revela menos agressivo para o equipamento, o que pode evitar intervenções de manutenção precoces [42]. Segundo a Iberdrola, a redução de consumo de energia elétrica associada a este tipo de compressor é, em média, de 35% e os custos no ciclo de vida do equipamento podem ser reduzidos em 22%, sendo o investimento recuperado em 1 ou 2 anos [31].

Nesta análise procedeu-se a uma monitorização do equipamento inicial, que consistiu na aferição da sua potência média de funcionamento, e respetivo consumo energético. Assim, seguiu-se o procedimento adotado nas aulas da unidade curricular de Gestão de Energia relacionadas com equipamentos deste tipo [36] e aproximou-se as frações de tempo em carga e vazio aos valores dos fatores de carga para cada regime. Concluiu-se que cerca de 40% do tempo de funcionamento era passado em vazio, consumindo o equipamento, nessas horas, cerca de 20% do valor total de energia.

A partir do valor de potência nominal do compressor em carga e após a medição da intensidade de corrente para esse regime (através de uma pinça amperimétrica), determinou-se o fator de potência do equipamento,  $\cos \phi$ , recorrendo à Equação 4.5. De seguida, repetiu-se a medição do valor de corrente em alívio ou vazio, e utilizou-se a mesma equação para determinar o valor de potência nominal nesse regime, desta vez com  $\cos \phi$  definido.

O cálculo das potências médias em regime de carga e de vazio considerou os fatores de carga, de acordo com a Equação 4.6. Finalmente, determinou-se um valor de potência média de funcionamento para o equipamento, através da Equação 4.7.

O Gráfico 9 ilustra o perfil de funcionamento do compressor.

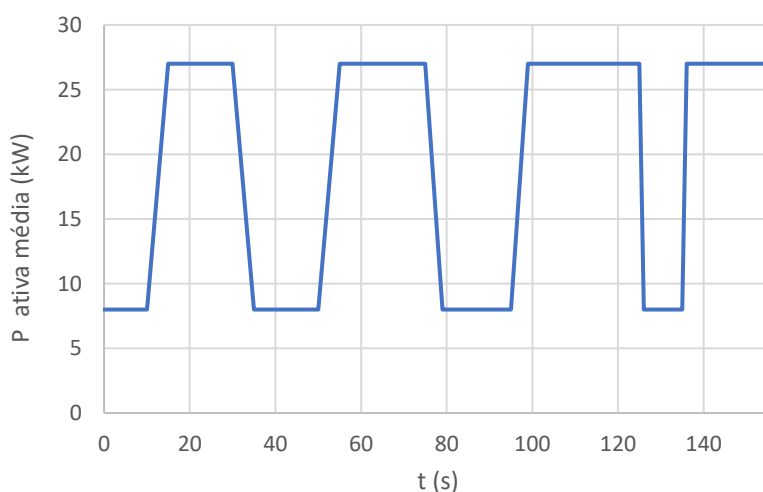


Gráfico 9 - Perfil de funcionamento do compressor inicial.

Tabela 12 - Dados do compressor em regime de alívio.

| Fração de tempo em vazio | Potência nominal (kW) | Potência média (kW) | Intensidade de corrente (A) |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|
| 0,42                     | 19                    | 8,04                | 30                          |

Tabela 13 - Dados do compressor em regime de carga.

| Fração de tempo em carga | Potência nominal (kW) | Potência média (kW) | Intensidade de corrente (A) |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|
| 0,58                     | 45                    | 26,25               | 70                          |

Tabela 14 - Tensão, fator de potência e potência média do compressor.

| Us (V) | $\cos (\phi)$ | Potência média funcionamento (kW) | Consumo médio anual (MWh) |
|--------|---------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 230    | 0,9           | 34,29                             | 277                       |

$$P_{nominal} (kW) = 3 * U * I * \cos \varnothing \quad (4.5)$$

$$P_{média} (kW) = P_{nominal} * \text{Fator de carga} \quad (4.6)$$

$$P_{média global} (kW) = P_{média (ON)} + P_{média (OFF)} \quad (4.7)$$

#### 4.2.1 – Investimento e Poupança

Ainda no decorrer deste estágio, a empresa decidiu implementar a medida sugerida, avançando para a aquisição de um novo compressor, com variador de velocidade incorporado. Neste contexto, foi possível analisar o novo equipamento e proceder a uma estimativa dos valores anuais de consumo e poupança.

Para o efeito, instalou-se um analisador de energia no compressor, com o objetivo de recolher dados relativos ao seu funcionamento, durante alguns dias (Figura 29). A estimativa de consumo anual do equipamento foi feita considerando o mesmo horário de funcionamento da desagregação de consumos inicial (24h, 7 dias por semana, 48 semanas por ano).



Figura 29 - Instalação do analisador de energia no novo compressor.

Tabela 15 -Dados de funcionamento do novo compressor.

| P média funcionamento (kW) | Consumo médio anual (MWh) |
|----------------------------|---------------------------|
| 22,28                      | 180                       |

Tabela 16 - Poupança associada à substituição do compressor.

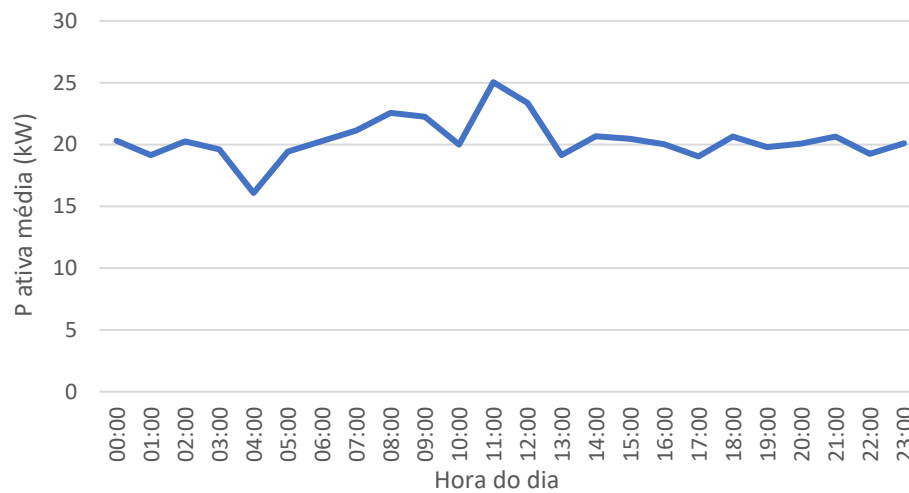
| €      | Energia elétrica (%) | Energia elétrica (MWh) | tep | tonCO <sub>2</sub> e |
|--------|----------------------|------------------------|-----|----------------------|
| 11 620 | 35                   | 96,8                   | 21  | 46                   |

Tabela 17 - Investimento e tempo de retorno.

| Investimento | Payback (anos) |
|--------------|----------------|
| 32 000 €     | 2,8            |

A substituição do compressor possibilita uma poupança energética considerável e concordante com os valores previstos [31] [42], confirmando o carácter prioritário desta intervenção. A poupança económica a ela associada também se revela significativa, com um tempo de retorno de investimento correspondente ao que foi mencionado anteriormente [31].

O Gráfico 10 ilustra o regime de funcionamento do novo equipamento, mais económico, constante e otimizado para as necessidades da empresa.



*Gráfico 10 - Perfil de funcionamento do novo compressor.*



### 4.3 – Análise Propano Vs Eletricidade

Para complementar a análise energética da Porfic, procedeu-se a uma análise que permite estabelecer o contraste entre os custos associados à produção de zamak e de alumínio recorrendo às duas fontes de energia da empresa: eletricidade e gás propano.

O objetivo deste estudo consistiu na determinação de um termo de comparação entre os dois recursos energéticos, que se traduziu no custo (específico) de cada tipo de energia por quilograma de metal produzido, para ambas as ligas.

#### 4.3.1 – Equipamentos de medição utilizados

Durante o procedimento, recorreu-se a um contador de gás analógico, de diafragma (Figura 30) que foi instalado junto aos queimadores, com o objetivo de determinar o volume de propano consumido pela máquina em estudo. O analisador de energia (Figura 31) permitiu a análise das máquinas operantes a eletricidade e da componente elétrica associada ao sistema de injeção das máquinas de propano.



Figura 30 - Contador de propano.



Figura 31 - Analisador de energia HT Vega 76.

#### 4.3.2 – Equipamentos de produção analisados

Posteriormente, procedeu-se ao estudo de 4 máquinas, 2 produtoras de zamak e 2 produtoras de alumínio. A diferença entre cada par de equipamentos reside na fonte de energia, ao nível dos fornos.

As máquinas de zamak, F01 (Figura 32), e de alumínio, F14 (Figura 33), operam com fornos elétricos, constituídos por resistências que ligam e desligam, automaticamente, consoante as necessidades de produção. A energia elétrica é transformada em energia térmica, por efeito de *Joule*, sendo transferida, posteriormente, para o metal.

As máquinas de zamak, F02 (Figura 34), e de alumínio, F10 (Figura 35), contêm fornos a gás, munidos de um queimador. Neste caso, a energia térmica é obtida através da oxidação do propano e corresponde ao calor que é liberto na sua combustão.

Outra diferença entre os referidos equipamentos é o facto de as máquinas de zamak procederem à fusão direta dos lingotes, ao passo que as máquinas de alumínio recebem a liga já fundida, realizando apenas manutenção da temperatura de operação. No caso das últimas, a energia envolvida no processo de fundição dos lingotes de alumínio foi estudada através da monitorização do forno fusor FF01, presente em anexo referido mais à frente, possibilitando a complementação dos dados recolhidos no presente estudo.



*Figura 32 - Máquina de zamak com forno elétrico, F01.*



*Figura 33 - Máquina de alumínio com forno elétrico, F14.*



*Figura 34 - Máquina de zamak com forno a gás, F02.*



*Figura 35 - Máquina de alumínio com forno a gás, F10.*

#### 4.3.3 – Metodologia e resultados

O procedimento utilizado nesta análise englobou a monitorização de diversas variáveis, tais como o número de injeções das máquinas e as peças que foram sendo produzidas, considerando as respetivas massas. Calculou-se, desta forma, a quantidade de metal fabricado.

A aferição dos consumos e respetivos custos de propano e de energia elétrica foi conseguida através do contador analógico e do analisador de energia.

Finalmente, calculou-se o custo de energia por quilograma de metal produzido. Para o efeito, foram considerados os valores da densidade de propano à pressão de operação ( $2,073 \text{ kg/m}^3$  à pressão de  $37 \text{ mbar}$ ) e dos custos associados a cada vetor energético, anteriormente apresentados na Tabela 5.

Os cálculos detalhados deste estudo podem ser consultados no Anexo F.

Tabela 18 - Resultados obtidos para zamak.

| Custo de energia por kg de ZAMAK - F01 (€/kg) | Custo de energia por kg de ZAMAK - F02 (€/kg) |
|---|---|
| 0,12  | 0,35  |

Tabela 19 - Resultados obtidos para alumínio.

| Custo de energia por kg de ALUMÍNIO – F14 (€/kg) | Custo de energia por kg de ALUMÍNIO – F10 (€/kg) |
|--|--|
| 0,15   | 0,27   |

#### 4.3.4 – Conclusões e estimativas de poupança

##### Análise de resultados

Analisando as tabelas 18 e 19, pode concluir-se que a produção de zamak e de alumínio com recurso a forno elétrico é significativamente mais económica que a produção em forno de propano.

Esta situação pode ser explicada pelo facto das resistências dos fornos elétricos gerirem automaticamente o seu funcionamento, consoante as necessidades de produção, contribuindo para a otimização da utilização de energia elétrica. Já os queimadores são de monoestágio, ou seja, apresentam-se sem possibilidade de modelação da chama, sendo a potência de funcionamento e, consequentemente, o consumo de propano constantes (após o arranque), independentemente das necessidades de produção.

Os custos da produção a eletricidade são idênticos para os dois metais, existindo uma redução no custo específico de propano para o alumínio, relativamente ao zamak. O facto da fundição de alumínio ocorrer num equipamento independente torna o processo mais económico. O forno fusor FF01 apresenta uma elevada capacidade de carga e, apesar dos elevados valores de potência e energia envolvidos no seu funcionamento, permite um custo (específico) de propano de 3 cêntimos por quilograma de alumínio fundido. Este valor foi determinado a partir da já referida monitorização deste equipamento (Secção 3.2.2), encontrando-se presente na Tabela 59 – Anexo G.

A fundição de zamak ocorre diretamente nos fornos das máquinas de injeção, que efetuam simultaneamente a manutenção da temperatura de operação do metal. Estes equipamentos têm uma capacidade de carga mais reduzida, em comparação com o forno fusor de alumínio, e apresentam um funcionamento mais inconstante - existe maior variação das necessidades de propano, cada vez que ocorre o carregamento de lingotes, por exemplo. Assim, é natural que o

forno da máquina de zamak F02 (fusor) necessite de uma maior quantidade de energia quando comparado com o forno da máquina alumínio F10 (não fusor), que efetua apenas manutenção da temperatura de operação do metal anteriormente fundido no forno independente (FF01).

É de realçar que os resultados obtidos correspondem apenas a uma amostra das peças produzidas pela empresa, num intervalo de tempo específico. Assim, existem aspetos que não coincidirão completamente em caso de repetição do procedimento anteriormente descrito. O peso das peças, as características do molde utilizado (como o número de peças obtidas por molde), a ocorrência de avarias e a produtividade da máquina constituem exemplos desses aspetos.

### Poupanças

Com o objetivo de estimar a poupança associada à produção de zamak e alumínio recorrendo a eletricidade, simulou-se um cenário onde toda a produção dos fornos a gás analisados, no ano de 2017, fosse feita em fornos elétricos.

Depois de proceder ao levantamento da quantidade de peças produzidas pelas máquinas em estudo e respetivas massas, foi possível determinar a produção anual de cada equipamento.

Multiplicando os valores de produção pelos custos específicos de eletricidade e propano para zamak (Tabela 18) e alumínio (Tabela 19), calculou-se a diferença de custos associada à produção atual e à produção em cenário simulado.

*Tabela 20 - Diferença de custos de produção de zamak com recurso a gás e eletricidade.*

| Produção anual Zamak (F02) (ton) | Custo produção propano (€) | Custo produção eletricidade (€) | Investimento forno elétrico zamak (€) | Poupança (€) | Payback (anos) |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------|----------------|
| 112                              | 39 200                     | 13 440                          | 25 000                                | 25 760       | 1              |

*Tabela 21 - Diferença de custos de produção de alumínio com recurso a gás e a eletricidade.*

| Produção anual Alumínio (F10) (ton) | Custo produção propano (€) | Custo produção eletricidade (€) | Investimento forno elétrico alumínio (€) | Poupança (€) | Payback (anos) |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|--|--------------|----------------|
| 91                                  | 24 570                     | 13 650                          | 30 000                                   | 10 920       | 2,8            |

#### 4.4 – Renovação do isolamento térmico dos fornos de alumínio operantes a propano

A comparação entre os custos específicos de produção de zamak e alumínio recorrendo a gás propano e eletricidade pretende sustentar a opção por fornos elétricos no momento da aquisição de novos equipamentos, por parte da empresa.

Para complementar o estudo dos fornos, procedeu-se a uma análise energética dos equipamentos considerando a componente térmica. Assim, este estudo contempla, numa primeira fase, as perdas de energia associadas a fenómenos de transferência de calor como a condução, convecção e radiação nos fornos de zamak e nos fornos de alumínio não fusores.

No final desta secção sugere-se a renovação do isolamento térmico dos fornos de alumínio a gás. Esta medida contribui, de forma considerável, para o aumento de eficiência energética dos referidos equipamentos, devido à redução significativa das perdas de energia associadas a fenómenos de transferência de calor.

##### 4.4.1 – Introdução aos fenómenos de transferência de calor

###### Condução

A transferência de calor por condução ocorre quando, num determinado meio, sólido - caso concreto do estudo - ou líquido, se verifica um gradiente de temperatura. O mecanismo físico presente nestas interações é a atividade atómica ou molecular, responsável pela transferência de energia das partículas mais agitadas (a uma temperatura superior) para as partículas de menor temperatura [43].

A equação que caracteriza a condução é a lei de *Fourier*, Equação 4.8, permitindo o cálculo da taxa de energia transferida por unidade de área – fluxo térmico. O sinal negativo surge porque a transferência de calor ocorre no sentido das temperaturas decrescentes ( $T_1 > T_2$ ) [43].

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (4.8)$$

Assumindo um regime estacionário, onde as propriedades do sistema se mantêm inalteradas ao longo do tempo, e unidimensional, com a transferência de calor a ocorrer numa só direção, surge a equação 4.9:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{\Delta T}{L} \quad (4.9)$$

Multiplicando o fluxo térmico pela área perpendicular à direção de transferência de calor e invertendo a diferença de temperaturas, de forma a eliminar o sinal negativo ( $\Delta T = T_1 - T_2$  ou  $T_i - T_{s1}$ ) obtém-se, finalmente:

$$q_x = k A \frac{\Delta T}{L} = k A \frac{T_i - T_{s1}}{L} (W) \quad (4.10)$$

Esta equação caracteriza a transferência de calor numa parede plana. Aqui,  $q_x$  é a taxa de transferência de calor, em W,  $k$  é a condutividade do material da parede (W/m.K),  $\Delta T$  a variação de temperatura (°C) e  $L$  a espessura da parede, em metros.

No caso do forno cilíndrico, a transferência de calor ocorre na direção radial e assumindo, mais uma vez, um regime estacionário e sem geração de calor, a forma apropriada da Lei de *Fourier* é dada por [43]:

$$q_r = \frac{2\pi L k (T_i - T_{s1})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (W) \quad (4.11)$$

### Convecção

O fenómeno de transferência de calor por convecção ocorre quando existe contacto entre uma superfície e um fluido em movimento, com temperaturas distintas [43].

A lei de Newton, utilizada para definir este fenómeno, é descrita pela seguinte equação:

$$q = hA(T_s - T_\infty) (W) \quad (4.12)$$

Na expressão apresentada,  $h$  é o coeficiente convectivo em W/m<sup>2</sup>K,  $A$  é a área da superfície onde o fluido incide (m<sup>2</sup>),  $T_s$  e  $T_\infty$  correspondem às temperaturas da superfície e do fluido (ar), respetivamente, em Kelvin. A temperatura  $T_s$  toma o valor de  $T_{s1}$  (parede lateral) e de  $T_{s2}$  (abertura do forno), conforme a zona analisada.

No caso em estudo, considerou-se a convecção existente nas paredes laterais (à temperatura  $T_{s1}$ ) de todos os fornos, devido à incidência do ar naquela superfície, bem como na abertura dos fornos. Aqui, aproximou-se o fenómeno a uma interação entre o ar e uma superfície virtual, à temperatura do metal líquido ( $T_{s2}$ ) na zona da abertura. O forno de alumínio a gás apresenta uma chaminé, para os gases de exaustão resultantes da oxidação do propano. Assim, foram também contabilizadas as perdas por convecção a partir das paredes laterais e da abertura da chaminé.

### Radiação

Radiação térmica é a transferência de energia por matéria que se encontra a uma temperatura diferente de 0 [43]. Pode ocorrer a partir de superfícies sólidas, gases ou líquidos. Este fenómeno ocorre devido a alterações na configuração eletrónica dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas e, desta forma, ao contrário do que acontece nos fenómenos de condução e convecção, a radiação não necessita da presença de um meio material para se propagar [43].

A equação que caracteriza o processo de transferência de calor por radiação é:

$$q = F_{1,2} * \sigma * \varepsilon * A * (T_{s2}^4 - T_{\infty}^4) (W) \quad (4.13)$$

Nesta expressão,  $F_{12}$  é o fator de forma, adimensional, entre as superfícies emissora, 1, e recetora, 2, que quantifica a quantidade de radiação emitida pela superfície 1 que é recebida pela superfície 2. A constante de *Stefan-Boltzmann*,  $5,67 \times 10^{-8} (W/m^2K^4)$ , é dada pela letra  $\sigma$ , e a emissividade da superfície é representada por  $\varepsilon$ .

Nos cálculos relativos aos fornos aproximou-se este fenómeno, através da criação de duas superfícies virtuais com a mesma geometria. A superfície emissora localiza-se no fundo do forno, apresentando a temperatura do metal fundido, e a superfície recetora é a zona superficial do forno, à temperatura do ar. A distância entre as superfícies é dada pela profundidade do forno,  $h$ .

A Figura 36 exemplifica a aproximação utilizada nos casos do forno de alumínio a gás e nos fornos de zamak. Para o forno de alumínio elétrico, o raciocínio desenvolvido é idêntico, variando apenas a geometria das superfícies, sendo nesse caso retângulos.

Os fatores de forma foram calculados com recurso aos diagramas da Figura 37, considerando as geometrias dos fornos em estudo.

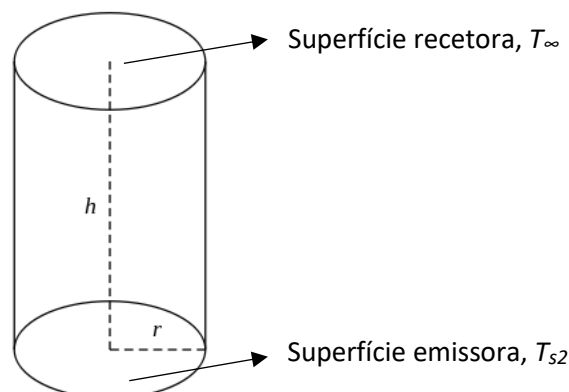


Figura 36 - Esquema ilustrativo da aproximação efetuada nos cálculos de radiação.



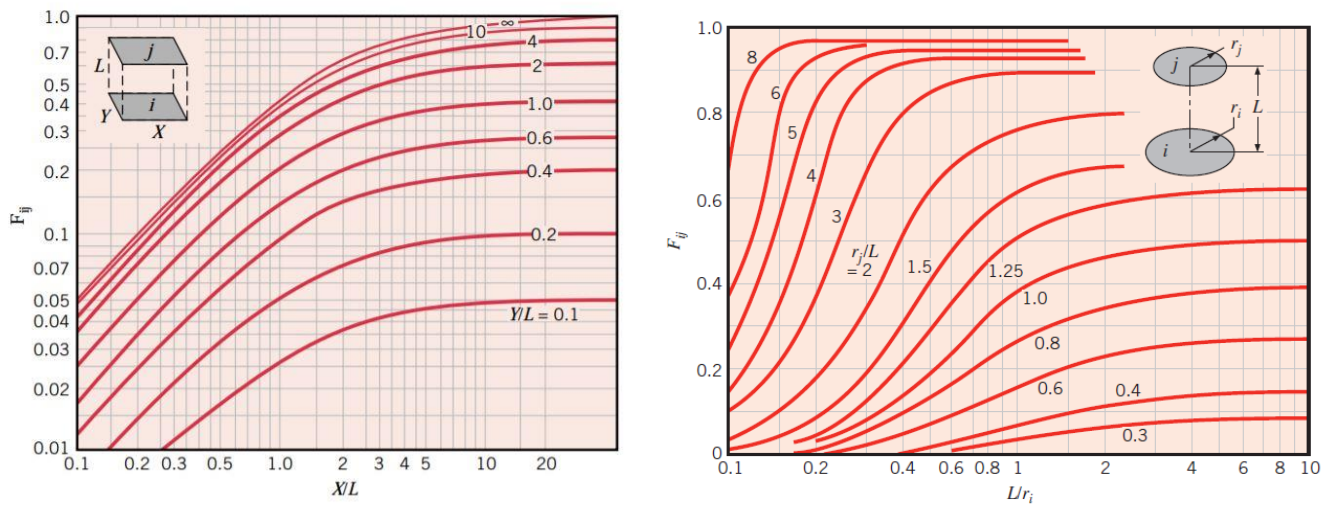


Figura 37 - Fatores de forma para retângulos paralelos alinhados e discos paralelos coaxiais.  
Fonte: [43]

#### 4.4.2 – Metodologia e resultados obtidos

##### Forno de alumínio a propano

O primeiro equipamento analisado foi o forno de alumínio a gás (Figura 38 e Figura 39). A Figura 40 ilustra, em corte, o interior do forno em estudo e a Figura 41 constitui uma representação da vista de cima do equipamento.



Figura 38 - Forno de alumínio a gás.



Figura 39 - Abertura do forno de alumínio a gás.

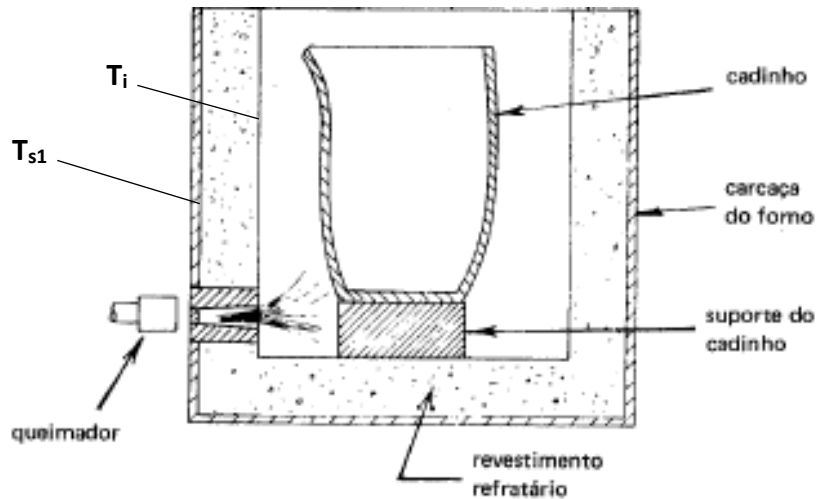


Figura 40 - Interior do forno de alumínio a gás. Fonte: [24]

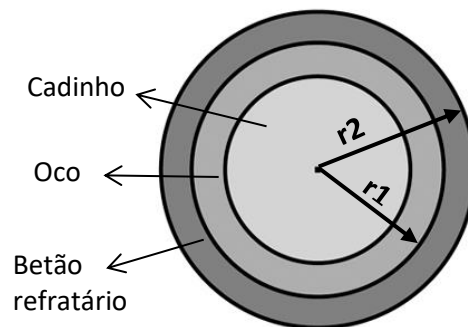


Figura 41 - Representação da vista de cima do forno.

Sendo conhecidas as temperaturas no interior do cadinho e na superfície externa do forno (medida com uma sonda de contacto), importava determinar a temperatura da superfície interna do refratário,  $T_i$ , de forma a poder aplicar a lei de Fourier e calcular a taxa de calor, por condução, ao longo deste revestimento. Estes fornos possuem ainda lã de vidro como segundo material isolante, mas, dado o estado de deterioração desta, a sua espessura foi desprezada, numa primeira análise.

Assim, utilizou-se uma condição fronteira, que determina que na interface de contacto da parede externa do cilindro com o ar ocorre, simultaneamente, condução e convecção. Pode então afirmar-se que, na referida interface, o valor da taxa de calor transferido por condução ao longo do refratário é igual à taxa de calor transferido por convecção, entre a superfície externa do forno e o ar, de acordo com a Equação 4.14 [43].

**Nota:** a espessura da “carcaça do forno” é muito reduzida, pelo que foi desprezada nesta análise.

$$\frac{2\pi Lk(T_i - T_{s1})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = hA(T_{s1} - T_{\infty}) \quad (=) \quad T_i = \frac{h r_2}{k} * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) * (T_{s1} - T_{\infty}) \quad (K) \quad (4.14)$$

A Tabela 22 apresenta os valores das variáveis utilizadas nos cálculos do forno de alumínio a gás.  $L$  é a altura do forno (cilindro) e  $A$  representa a sua área lateral, dada pela Equação 4.15. O coeficiente de transferência por convecção,  $h$ , pode estimar-se, para este caso, a partir da Equação 4.16, válida para velocidades do fluido, relativamente à superfície de incidência, até 20 m/s [44]. No caso do problema considerado, a velocidade do ar é igual a 0 m/s.

$$A_{lat} = 2\pi r_2 L \quad (m^2) \quad (4.15)$$

$$h = 10,45 - v + 10v^{\frac{1}{2}} \left( \frac{W}{m^2K} \right) \quad (4.16)$$

Tabela 22 - Variáveis utilizadas nos cálculos do forno de alumínio a propano.

|  |             |
|--|-------------|
| $h \quad (W/m^2K)$   | 10,45       |
| $k \text{ refratário@}953K \quad (680^\circ C) \quad (W/m.K) \quad [45][46]$     | 1,30        |
| $T_{s1} \text{ (superfície lateral) } (K)$                                       | 423 (150°C) |
| $T_{s2} \text{ (abertura do forno) } (K)$  | 953 (680°C) |
| $T_{\infty} \text{ (ar) } (K)$   | 303 (32°C)  |
| $r_2 \quad (m)$  | 0,68        |
| $r_1 \quad (m)$  | 0,52        |
| $L \text{ forno} \quad (m)$  | 1,10        |
| $\phi_{\text{cadinho}} \quad (m)$  | 0,60        |
| $\phi_{\text{interno chaminé}} \quad (m)$  | 0,13        |
| $\phi_{\text{externo chaminé}} \quad (m)$  | 0,28        |
| $L \text{ chaminé} \quad (m)$  | 1,00        |
| $T_{\text{parede chaminé}} \quad (K)$  | 383 (110°C) |
| $T_{\text{abertura chaminé}} \quad (K)$  | 673 (400°C) |
| $\epsilon \text{ betão@} 680^\circ C \quad [47][48]$                             | 0,94        |
| $F_{1,2} \quad (r_{\text{cadinho}} = 0,3 \text{ m e } d_{1,2} = 0,65 \text{ m})$ | 0,15        |

Desta forma, foi possível determinar o valor da temperatura interior,  $T_i$ , que corresponde a **599 K** (326°C).

Posteriormente, foi possível determinar o valor das perdas por fenómenos de condução, convecção e radiação, respetivamente.

Tabela 23 - Perdas por condução e radiação.

| Q condução (kW) | Q Radiação (kW) |
|-----------------|-----------------|
| 5,89            | 1,85            |

Tabela 24 - Perdas por convecção.

| Q convecção - Forno (kW) |          | Q convecção - Chaminé (kW) |          |
|--------------------------|----------|----------------------------|----------|
| Parede lateral           | Abertura | Parede lateral             | Abertura |
| 5,89                     | 1,92     | 0,74                       | 0,05     |
| 7,81                     |          | 0,79                       |          |
| 8,60                     |          |                            |          |

Tabela 25 - Perdas por transferência de calor no forno de alumínio a gás.

| Perda total (kW) |
|------------------|
| 16,34            |

### Forno de alumínio elétrico

O segundo equipamento estudado foi o forno de alumínio elétrico (Figura 42).



Figura 42 - Forno de alumínio elétrico e respetiva abertura.

### Conceito de resistência térmica

Nas situações de transferência de calor unidimensional e sem geração de energia interna, em regime estacionário, verifica-se uma analogia entre as difusões de calor e de carga elétrica [43].

A relação entre a condução de eletricidade e uma resistência elétrica é também válida entre uma resistência térmica e a condução de calor.

$$\Delta V = RI \quad (=) \quad R = \frac{\Delta V}{I} \quad (4.17) \quad \rightarrow \quad \Delta T = R_T q_x (=) R_T = \frac{\Delta T}{q_x} \quad (4.18)$$

A lei de Ohm é representada pela Equação 4.17, onde  $\Delta V$  representa o potencial elétrico,  $R$  a resistência à passagem de corrente elétrica e  $I$  a intensidade desta corrente. No caso de  $I$  ser constante, a variação de potencial entre os diferentes pontos do circuito elétrico depende apenas do valor das resistências.

Da mesma forma, nos problemas de transferência de calor, para uma taxa de transferência de calor constante ( $q_x$ ), a temperatura dos diferentes pontos vai depender apenas do valor da resistência térmica total – Equação 4.18.

Este raciocínio é frequentemente aplicado nas equações de transferência de calor por condução (Lei de *Fourier*) e por convecção (Lei de *Newton*) [43]. As relações obtidas são as seguintes:

$$q_x = k A \frac{\Delta T}{L} \quad (=\Rightarrow) \quad \Delta T = \overset{R_T}{\left( \frac{L}{kA} \right)} q_x \quad (4.19)$$

$$q_r = \frac{2\pi L k (T_i - T_{s1})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (=\Rightarrow) \quad (T_i - T_{s1}) = \overset{R_T}{\left( \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k} \right)} q_r \quad (4.20)$$

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (=\Rightarrow) \quad (T_s - T_\infty) = \overset{R_T}{\left( \frac{1}{hA} \right)} q \quad (4.21)$$

A representação sob a forma de circuitos revela-se uma ferramenta extremamente útil para interpretação e resolução de problemas de transferência de calor mais complexos [43].

No exemplo seguinte (Figura 43), pretende-se determinar a taxa global de transferência de calor numa parede composta, constituída por 3 materiais distintos (A, B e C) sujeita a convecção nas duas extremidades. As relações deduzidas acima são aplicadas nas transferências de calor por condução e convecção, de forma a definir as resistências térmicas locais.

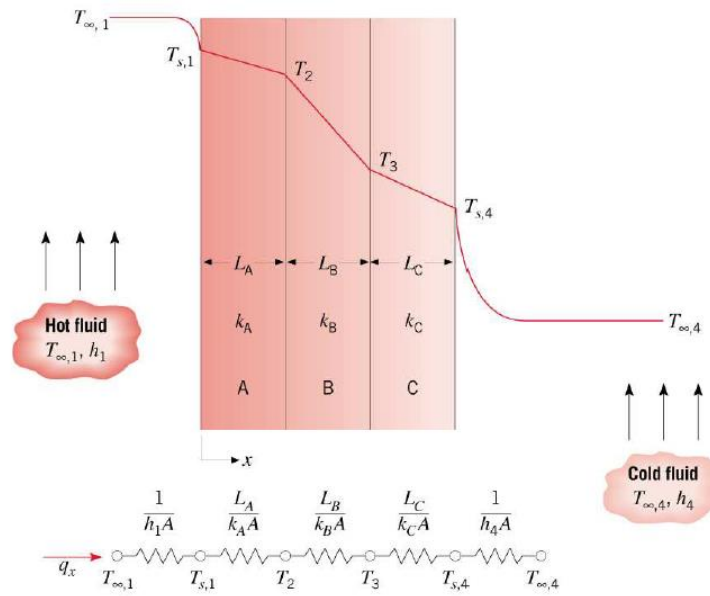


Figura 43 - Circuito térmico equivalente para uma parede composta, em série.  
Fonte: [43]

Para determinar o valor global da taxa de transferência de calor, é suficiente ter conhecimento dos valores de temperatura nas extremidades do circuito (no caso do exemplo, as temperaturas dos fluidos que incidem nas superfícies opostas da parede), determinar a resistência térmica total, adotando o raciocínio utilizado no somatório de resistências elétricas em série, e escrever a equação que caracteriza a transferência de calor global [43]:

$$R_T = \frac{1}{A} \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_4} \right] \left( \frac{K}{W} \right) \quad (4.21)$$

$$q_x = \left( \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 4}}{R_T} \right) (W) \quad (4.22)$$

O forno de alumínio elétrico, com geometria aproximadamente paralelepípedica, possui dois materiais isolantes, na composição da sua parede: betão refratário (índice  $b$ ) e lã de vidro (índice  $l$ ). Assim, procedeu-se ao cálculo do fluxo de transferência de calor por condução recorrendo ao conceito de resistência térmica e à forma da Lei de *Fourier* relativa a uma parede plana:

$$q_x'' = \frac{T_i - T_{s1}}{R_T} = \frac{T_i - T_{s1}}{\frac{L_b}{k_b} + \frac{L_l}{k_l}} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (4.23)$$

Neste caso, a transferência de energia para o metal é feita diretamente, por intermédio de resistências elétricas presentes na tampa do forno.

Não existindo cadinho nem oco, como no forno de alumínio a gás, assumiu-se que a temperatura interior do refratário,  $T_i$ , é a temperatura do metal fundido, com o qual estabelece contacto direto.

Para converter o fluxo em potência térmica (sob a forma de perdas) foi necessário multiplicar o valor obtido pelas áreas das 4 paredes do forno, iguais duas a duas.

O cálculo das perdas por convecção e por radiação para o forno em estudo foi feito da mesma forma que para o forno de alumínio a propano.

A Figura 44 consiste numa representação do interior de um forno elétrico de alumínio. A imagem não corresponde exatamente ao equipamento da empresa, servindo assim apenas para elucidar quanto à forma de como a energia é transmitida ao alumínio e de como é estabelecido o contacto entre o metal e o betão refratário.

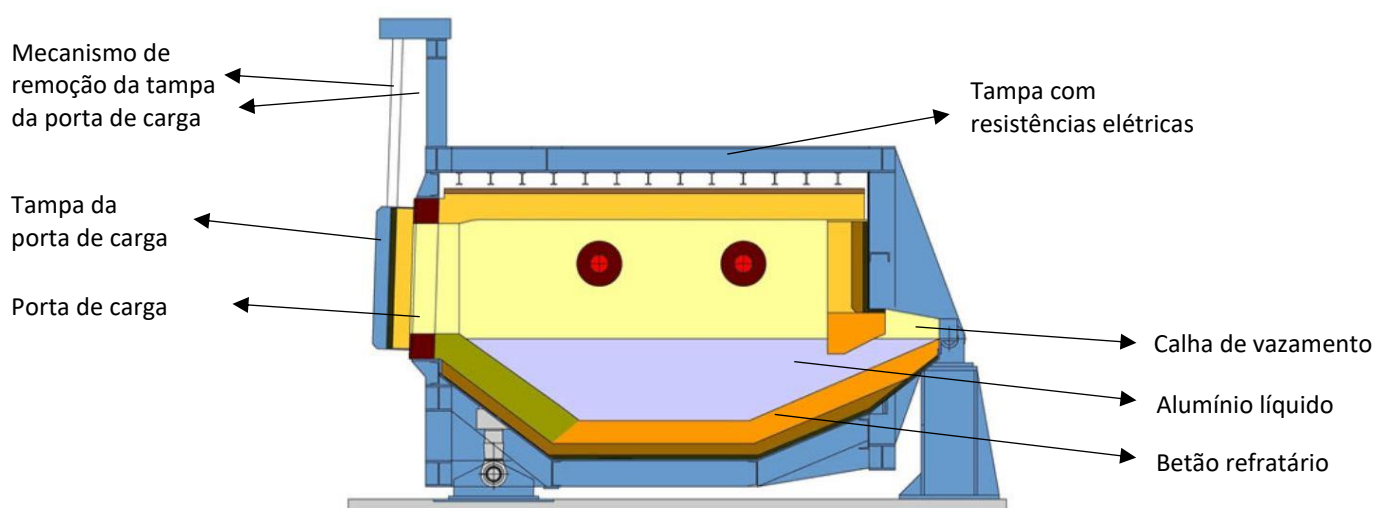


Figura 44 - Interior de um forno de alumínio elétrico. Fonte: [49]

Tabela 26 - Variáveis utilizadas nos cálculos do forno de alumínio elétrico.

|  |             |
|--|-------------|
| $h$ ( $W/m^2K$ )                                       | 10,45       |
| $k$ refratário@953K (680°C) ( $W/m.K$ ) [45][46]       | 1,30        |
| $L$ betão ( $m$ )                                      | 0,23        |
| $k$ lâ ( $W/m.K$ ) [43][50]                            | 0,04        |
| $L$ lâ ( $m$ )   | 0,075       |
| $T_{s1}$ (superfície lateral) ( $K$ )                  | 333 (60°C)  |
| $T_{s2}$ (abertura do forno) ( $K$ )                   | 953 (680°C) |
| $T_{\infty}$ (ar) ( $K$ )                              | 303 (32°C)  |
| $A_1$ parede ( $m^2$ )                                 | 0,72        |
| $A_2$ parede ( $m^2$ )                                 | 1,88        |
| $A$ abertura forno ( $m^2$ )                           | 0,2         |
| $\epsilon$ betão@ 680°C [47][48]                       | 0,94        |
| $F_{1,2}$ ( $l$ abertura = 0,5 m e $d_{1,2}$ = 0,48 m) | 0,17        |

Tabela 27 - Perdas por condução e radiação.

| Q Condução (kW) | Q Radiação (kW) |
|-----------------|-----------------|
| 1,57            | 1,48            |

Tabela 28 - Perdas por convecção.

| Q convecção - Forno (kW) |          |
|--------------------------|----------|
| Paredes laterais         | Abertura |
| 1,63                     | 1,36     |
| 2,99                     |          |

Tabela 29 - Perdas por transferência de calor no forno de alumínio a eletricidade.

| Perda total (kW) |
|------------------|
| 6,04             |

### Fornos de zamak (propano e eletricidade)

Os fornos de zamak operantes a propano apresentam uma configuração geométrica interior idêntica aos fornos de alumínio a gás (Figura 40), com o refratário e a “carcaça do forno” formados por paredes planas.

Os fornos elétricos são também semelhantes a nível geométrico, sendo a transferência de energia para o zamak feita com recurso a resistências elétricas.



Assim, foi necessário repetir o raciocínio que permite calcular a temperatura da superfície interna do refratário ( $T_i$ ), desta vez para uma situação de transferência de calor por condução numa geometria aproximada a parede plana, nos dois fornos – Equação 4.24.

$$k A \frac{T_i - T_{s1}}{L} = hA(T_{s1} - T_{\infty}) \quad (=) \quad T_i = \frac{L}{k} h (T_{s1} - T_{\infty}) + T_{s1} \quad (K) \quad (4.24)$$

De seguida, aplicaram-se as mesmas equações das etapas anteriores, tendo sido consideradas, para condução e convecção, as 4 paredes do forno (todas iguais).

Tabela 30 - Variáveis utilizadas nos cálculos dos fornos de zamak.

|  |             |
|--|-------------|
| $h \text{ (W/m}^2\text{K)}$  | 10,45       |
| $k \text{ refratário@703K (430°C) (W/m.K) [45][46]}$               | 0,9         |
| $L \text{ betão (m)}$  | 0,23        |
| $T_{s1} - \text{gás (superfície lateral) (K)}$                     | 368 (95°C)  |
| $T_{s1} - \text{eletricidade (superfície lateral) (K)}$            | 328 (55°C)  |
| $T_i - \text{gás (interna refratário) (K)}$                        | 542 (269°C) |
| $T_i - \text{eletricidade (interna refratário) (K)}$               | 395 (122°C) |
| $T_{s2} \text{ (abertura do forno) (K)}$                           | 703 (430°C) |
| $T_{\infty} \text{ (ar) (K)}$                                      | 303 (32°C)  |
| $A \text{ parede (m}^2\text{)}$                                    | 0,59        |
| $\varnothing \text{ abertura forno (m)}$                           | 0,32        |
| $\epsilon \text{ betão@ 430°C [47][48]}$                           | 0,94        |
| $F_{1,2} \text{ (r abertura = 0,16 m e d}_{1,2} = 0,45 \text{ m)}$ | 0,10        |

Tabela 31 - Perdas por transferência de calor nos fornos de zamak.

| Fenómeno                           | Forno a gás - Zamak | Forno elétrico - Zamak |
|------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Condução (kW)                      | 1,59                | 0,61                   |
| Convecção (paredes laterais) (kW)  | 1,59                | 0,61                   |
| Convecção (abertura do forno) (kW) | 0,34                | 0,34                   |
| Convecção (total) (kW)             | 1,93                | 0,95                   |
| Radiação (kW)                      | 0,10                | 0,10                   |
| <b>Perda total (KW)</b>            | <b>3,62</b>         | <b>1,66</b>            |

#### 4.4.3 – Conclusões e oportunidades de melhoria

No final desta análise, pode concluir-se que a perda de energia associada a fenómenos de transferência de calor é significativamente superior nos equipamentos que operam a propano.

Um dos fatores que mais contribui para esta discrepância, nos equipamentos de alumínio, é a dimensão da abertura do forno. No caso do forno elétrico, esta abertura é retangular, sendo a área exposta a convecção muito menor, quando comparada com a abertura circular do forno a gás.

Outra situação, que faz da convecção o mecanismo de transferência de calor mais penalizador nos fornos a propano, é o estado de deterioração do isolamento, mais especificamente da lã de vidro.

Esta conclusão é fundamentada pela diferença de temperatura entre a superfície exterior do forno elétrico (60°C) e do forno a gás (150°C), ambas medidas com sonda de contacto. É notório um desgaste da lã muito mais evidente no segundo caso, onde o isolamento se revela menos eficiente na retenção do calor no interior do forno. O estado do isolamento desempenha também um papel fundamental na transferência de calor por condução, cujo valor é muito superior no caso do forno de alumínio a gás.

No caso dos fornos de zamak, não existe lã de vidro no isolamento, sendo o betão refratário o único material isolante. Assim, a discrepância nas perdas por transferência de calor baseia-se na diferença de temperaturas das superfícies exteriores dos fornos.

Este valor de temperatura é superior no forno de zamak a gás, o que se pode justificar pela maior deterioração do refratário devido à oxidação de propano, mais agressiva para o isolamento (devido às impurezas e às partículas resultantes da mesma) quando comparada com a utilização de resistências elétricas.

#### 4.4.4 – Impacto da renovação da lã de vidro – Poupança energética e económica

Nesta secção pretende-se quantificar a poupança associada à renovação do material de isolamento dos fornos de manutenção de temperatura, a nível económico e energético.

##### Forno de alumínio a propano

A Figura 45 representa a vista de cima do forno de alumínio a gás, incluindo a espessura da nova lã de vidro.

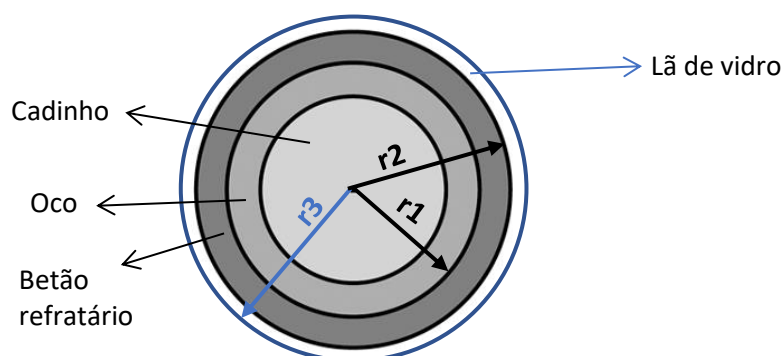


Figura 45 - Representação da vista de cima dos fornos de alumínio a gás, com lã de vidro.

O primeiro passo do procedimento consistiu na determinação da nova temperatura exterior da parede lateral do forno,  $T_{s1}$ , previsivelmente menor que a medida anteriormente ( $423K - 150^{\circ}C$ ), devido ao reforço do isolamento.

Desta forma, aplicou-se, mais uma vez, a condição fronteira verificada na interface de contacto entre a superfície externa do forno e o ar. Igualando os valores das taxas de transferência de calor por condução, ao longo do betão refratário e da lã de vidro, e por convecção, entre a superfície externa do cilindro e o ar, e recorrendo ao conceito de resistência térmica global para uma geometria cilíndrica, obtém-se:

$$\frac{(T_i - T_{s1})}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_b} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_L}} = hA(T_{s1} - T_{\infty}) \quad (4.25)$$

Nesta expressão,  $T_i$  é a temperatura da superfície interior do refratário ( $599K - 326^{\circ}C$ ), anteriormente determinada, e os índices  $b$  e  $l$  são relativos a betão refratário e lã de vidro, respetivamente. Considerou-se a aquisição de uma lã de vidro com  $75mm$  de espessura e com um valor de condutibilidade térmica de  $0,04 W/m.K$ , com base nos dados do mercado [51]. Assim,  $r_3$  corresponde ao raio do isolamento, agora acrescido da espessura da lã ( $r_2 + 0,075 m = 0,755 m$ ).

Desta forma, determinou-se a nova temperatura da superfície exterior do cilindro, que corresponde a um valor de  $316K (43^{\circ}C)$ , confirmando a previsão anterior.

De seguida, calculou-se o impacto da renovação da lã de vidro (e da nova temperatura exterior) na transferência de calor por condução e por convecção através das paredes laterais do forno.

$$q_{cond} = \frac{(T_i - T_{s1})}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_b} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_L}} \quad (4.26)$$

$$q_{conv} = hA(T_{s1} - T_{\infty}) \quad (4.27)$$

Posteriormente, a partir dos resultados obtidos, estimou-se os valores de poupança energética e económica associados à renovação do isolamento dos 7 fornos de alumínio da Porfic. Neste cálculo, recorreu-se ao horário de funcionamento já utilizado na secção de desagregação de consumos.

Tabela 32 - Perdas por transferência de calor, para fornos de alumínio a gás, antes e depois da renovação da lã de vidro.

| Impacto da renovação do isolamento |                 |                 |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Fenómeno                           | Sem lã de vidro | Com lã de vidro |
| Condução (kW)                      | 5,89            | 0,69            |
| Convecção (kW)                     | 8,60            | 3,42            |
| Radiação (kW)                      | 1,85            | 1,85            |
| Total                              | 16,34           | 5,96            |

Tabela 33 - Poupança associada à renovação do isolamento em fornos de alumínio a propano.

| Poupança por forno (kW) | Poupança anual total (7 fornos) (tep) | Poupança anual total de propano (ton) | Poupança anual total (€) | Poupança anual total (tonCO <sub>2</sub> e) |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---|
| 10,38                   | 17                                    | 15                                    | 13 450                   | 44  |

Cada forno apresenta uma área de lateral de cerca de 5 m<sup>2</sup>, calculada a partir da Equação 4.15, pelo que seria necessário adquirir isolamento para cerca de 35 m<sup>2</sup>. De acordo com a tabela de preços da *Saint Gobain Isover Ibérica* [52], o investimento associado seria de cerca de 135€, correspondentes a 3 embalagens de 14,4 m<sup>2</sup>. Na estimativa de investimento total associado a esta medida utilizou-se o valor de 200€, com o objetivo de considerar eventuais custos adicionais, como portes de envio.

#### Forno de alumínio elétrico

O passo seguinte consistiu em aplicar o mesmo raciocínio ao forno de alumínio elétrico.

Na análise inicial deste forno, a lã de vidro não foi desprezada, uma vez que a temperatura da parede exterior do forno,  $T_{s1}$ , medida com sonda, se fixou nos 60°C. Este é um valor de temperatura que sugere uma boa eficiência do isolamento.

No entanto, para confirmar esta consideração, repetiu-se o procedimento acima descrito, com o objetivo de comparar temperatura de superfície medida com sonda (60°C) à temperatura “ $T_{s1}$  ideal”, conseguida mediante a instalação de uma nova lã de vidro.

É de relembrar que, neste caso, as paredes do forno foram aproximadas a paredes planas, pelo que se obtém:

$$\frac{(T_i - T_{s1})}{\frac{L_b}{k_b} + \frac{L_L}{k_L}} = h(T_{s1} - T_{\infty}) \quad (4.28)$$

Finalmente, alcançou-se um valor um valor de  $T_{s1}$  “ideal” de 59°C, o que comprova que a lâ de vidro do forno elétrico se encontra em bom estado.

Assim, a análise da substituição da lâ de vidro incidiu apenas sobre os fornos de alumínio a gás.

O estudo das perdas de energia por fenómenos de transferência de calor permitiu verificar que os fornos elétricos são mais eficientes.

No caso do forno de zamak, sendo o refratário o único isolamento, deve proceder-se à sensibilização dos operadores para utilização do equipamento em condições próximas das ideais. Para o efeito, os operadores devem, por exemplo, proceder à cobertura dos fornos nos períodos de pausa na produção e à verificação periódica do estado de deterioração do isolamento e do cadinho, de forma a minimizar as perdas de energia associadas a fenómenos de transferência de calor.

Nos fornos de alumínio, a substituição da lâ de vidro revela-se uma medida de impacto significativo na redução das perdas por condução e convecção, ficando assim o forno de alumínio a gás com um valor de perdas por transferência de calor semelhante ao forno elétrico (Tabela 29 e Tabela 32).

Desta forma, a renovação do material de isolamento constitui uma medida de eficiência energética interessante complementarmente à opção de compra de fornos elétricos.



## 5 - Conclusões

No capítulo final deste relatório pretende-se proceder a um resumo das sugestões de implementação de medidas de eficiência energética desenvolvidas ao longo do estágio.

Em jeito de balanço final, apresenta-se também o resumo dos investimentos e poupanças associados às medidas sugeridas. Para contextualizar estas sugestões a nível temporal, realizou-se uma estimativa de tempo de retorno de investimento global.

### 5.1 – Síntese das sugestões de medidas a implementar com estimativa de tempo de retorno

A primeira oportunidade de melhoria identificada consiste no registo das instalações da empresa no site da ADENE, declarando-se como consumidora intensiva de energia (instalação CIE). Posteriormente, a Porfic poderá efetuar uma auditoria energética (utilizando eventualmente a desagregação efetuada no âmbito deste estágio) e usufruir dos benefícios mencionados na Secção 3.1.1. A isenção do ISP permitiria poupar 7,99€ por cada tonelada de propano, o que corresponderia a 3 320€/ano.

A segunda sugestão prende-se com a aquisição de uma bateria de condensadores, capaz de gerar a energia reativa necessária ao funcionamento dos equipamentos, evitando que este consumo seja feito a partir da rede, com custos associados. Esta medida possibilitaria uma poupança anual de cerca de 4 840€.

A substituição do compressor por um equipamento com variador eletrónico de velocidade (Secção 4.2) foi concretizada durante o estágio e constitui uma intervenção de grande impacto no contexto energético da empresa. Esta alteração será responsável por uma poupança anual de 21 tep, avaliada em cerca de 11 620€.

A análise propano Vs eletricidade constituiu o estudo de maior duração, na ordem de trabalhos realizados. A principal conclusão retirada desta análise é que a produção de metal recorrendo a gás é significativamente mais dispendiosa quando comparada com a utilização de energia elétrica.

Assim, a lógica de produção mais eficiente assentaria na fundição de zamak recorrendo a fornos de eletricidade (Tabela 18 e Tabela 20). No caso do alumínio, a fundição deve manter-se a cargo do forno fusor, operante a propano, e a manutenção da sua temperatura de operação deveria ocorrer, preferencialmente, em equipamentos elétricos (Tabela 19 e Tabela 21).

Uma vez que a produção da empresa assenta maioritariamente em peças de alumínio, as intervenções devem ocorrer prioritariamente nos equipamentos que operam este metal. Nesse sentido, e tendo em conta a complexidade da substituição dos fornos a nível económico e temporal, uma medida complementar ou alternativa, de impacto significativo, poderá ser a renovação do isolamento dos fornos de alumínio a gás (não fusores), minimizando as perdas ocorridas por fenómenos de transferência de calor. Através da renovação da lã de vidro, é possível reduzir significativamente o valor das perdas de energia por condução e convecção nos referidos fornos, o que permitiria alcançar um valor de poupança anual de cerca 17 tep, traduzida em cerca de 13 450€.

Considerando a constante expansão da empresa e o volume crescente de encomendas (e consequente necessidade de capacidade produtiva), o melhor cenário seria uma combinação das medidas de substituição do isolamento dos fornos de alumínio já existentes e de aquisição de fornos elétricos, quando se considerar oportuno.

A empresa deve também reforçar a política de sensibilização dos operadores para que utilizem os equipamentos em condições próximas das ideais. Esta sugestão é fundamentada pela análise do já referido Anexo H, onde é avaliado o rendimento do forno, comparando-o com um contexto teórico “ideal”, refletindo-se também as perdas de eficiência de processo associadas a erros do operador.

A Tabela 34 constituiu o resumo dos investimentos e poupanças associados às medidas sugeridas. Nesta tabela é contabilizada a aquisição de fornos elétricos de zamak e alumínio, em detrimento de fornos a gás propano. Esta análise pretende sustentar a opção por fornos elétricos, no momento em que a empresa pretenda investir em novos equipamentos, de forma a aumentar a sua capacidade produtiva.

*Tabela 34 – Investimento e poupança associados às sugestões.*

| <b>Medida sugerida</b>                          | <b>Investimento associado (€)</b> | <b>Poupança anual (€)</b> |
|---|-----------------------------------|---------------------------|
| Declaração da empresa como CIE                  | -                                 | 3 320                     |
| Bateria de condensadores                        | 2 600                             | 4 840                     |
| Compressor com VEV                              | 32 000                            | 11 620                    |
| Aquisição de forno de zamak elétrico            | 25 000                            | 25 760                    |
| Aquisição de forno de alumínio elétrico         | 30 000                            | 10 920                    |
| Renovação da lã de vidro dos fornos de alumínio | 200                               | 13 450                    |
| <b>Total</b>                                    | <b>89 800</b>                     | <b>69 910</b>             |



Tabela 35 - Estimativa de tempo de retorno associado às medidas a implementar.

| Payback global (anos) |
|-----------------------|
| 1,3                   |

Considerando um cenário de futuro próximo, contabilizando apenas as medias de poupança a curto prazo (sem a aquisição dos fornos), obtém-se um valor de poupança anual de 33 230€, mediante um investimento de 34 800€, recuperável em cerca de 1 ano.

Conclui-se assim que o tempo de retorno associado às medidas sugeridas é, em ambos os contextos, inferior a um ano e meio. Desta forma, num cenário onde se proceda à implementação imediata de todas as medidas sugeridas, será possível otimizar o processo produtivo da empresa - a nível de custos e de eficiência energética - num período de tempo relativamente curto.

A tabela acima representada contabiliza apenas a análise económica das sugestões de medidas a implementar. No final deste capítulo figura a Tabela 36, que engloba também as vertentes de poupança energética e o impacto das sugestões a nível de redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

## 5.2 – Sugestões de tarefas futuras

No decorrer do estágio, foi possível identificar uma oportunidade de melhoria ao nível da energia térmica associada aos gases de exaustão do forno fusor FF01. À saída da chaminé do forno, a temperatura destes gases é de cerca de 150°C.

Como evidenciado neste trabalho, a Porfic apresenta, atualmente, uma elevada necessidade de gás propano, devido à presença de inúmeros queimadores no seu processo produtivo. Este gás encontra-se armazenado num reservatório, no estado líquido, sendo posteriormente transformado em vapor através de um permutador de calor, ou vaporizador, para consumo da empresa.

Com a crescente expansão, a Porfic regista um volume de encomendas cada vez mais elevado e, conseqüentemente, necessidades de produção progressivamente superiores. Para fazer face a estas necessidades, será necessário aumentar a capacidade de vaporização instalada e uma forma de o conseguir poderia ser o aproveitamento do calor dos gases de exaustão do forno fusor FF01.

Assim, numa primeira fase, recorrer-se-ia a um permutador ar/água, com o objetivo de transmitir o calor dos gases da chaminé à água, inicialmente à temperatura ambiente. De seguida,

a água, já aquecida, seria remetida para um segundo permutador “água” /água, onde se verificaria a interação entre o propano, na fase líquida, e a água quente, de forma a proceder à vaporização do GPL.

Através do pré-aquecimento da água, a empresa teria à sua disposição uma maior quantidade de energia (calor), que permitiria vaporizar mais propano no mesmo intervalo de tempo. Desta forma, seria necessário proceder ao dimensionamento de um vaporizador com uma capacidade de vaporização (ou caudal) superior, ou à instalação de mais vaporizadores, de menor capacidade, em paralelo.

Além do aumento da capacidade de vaporização da instalação, esta solução permitiria um maior aproveitamento da energia térmica associada à oxidação de propano e do próprio recurso energético e, conseqüentemente, da eficiência energética do processo produtivo da empresa. A reintrodução de energia, inicialmente desperdiçada, no processo produtivo, corresponde ainda a uma abordagem concordante com o conceito de economia circular.

Tabela 36 - Impacto das sugestões de medidas a implementar: Poupança económica, energética e redução de emissões.

|   | Poupanças anuais geradas com as iniciativas |                    |                      | Investimento<br>(quando aplicável) | Payback |
|---|---|--------------------|----------------------|------------------------------------|---------|
|   | Poupança Energética                         | Poupança Económica | Redução de Emissões  |                                    |         |
| Sugestão de medida a implementar  | tep   | €                  | tonCO <sub>2</sub> e | €                                  | Anos    |
| Aquisição de compressor com VEV   | 21  | 11 620             | 46                   | 32 000                             | 2,8     |
| Renovação do isolamento dos fornos de alumínio a gás                        | 17  | 13 450             | 44                   | 200                                | 0,01    |
| Aquisição de uma bateria de condensadores - Energia Reativa                 | -   | 4 840              | -                    | 2 600                              | 0,5     |
| Declaração da empresa como instalação CIE                                   | -   | 3 320              | -                    | -                                  | -       |
| Aquisição de um forno elétrico de zamak em detrimento de forno a propano    | -   | 25 760             | -                    | 25 000                             | 1       |
| Aquisição de um forno elétrico de alumínio em detrimento de forno a propano | -   | 10 920             | -                    | 30 000                             | 2,8     |

A implementação conjunta das medidas de eficiência sugeridas permitiria à Porfic alcançar uma redução de 5% no valor do seu consumo energético anual (38 tep), avaliada em cerca de 69 910€ (economia anual de 12%), mediante um investimento total de 89 800€, recuperável em cerca de 16 meses. A redução de emissões associadas ao processo produtivo da empresa ronda as 100 toneladas de dióxido de carbono equivalente.



## Referências

1. Lutche Engineering – Energy Consulting. *Integrated and Sustainable Energy Solutions*. Consultado em setembro, 2018, em: <http://www.lutche.pt/servicos/gestao-de-energia>
2. Macrotec – Gabinete de Engenharia. *A importância de gerir o consumo de energia*. Consultado em setembro, 2018, em: <http://www.macrotec.pt/a-importancia-de-gerir-o-consumo-de-energia>
3. Portal da Eficiência Energética. *Conceitos*. Consultado em setembro de 2018, em: <http://www.portal-eficienciaenergetica.com.pt/conceitos.html>
4. Cleveland, J. (2009). *Concise Encyclopedia of History of Energy*. San Diego, USA: Elsevier Inc. Disponível em: [https://books.google.pt/books?id=JPjqRIIWHcoC&pg=PA287&lpg=PA287&dq=final+energy+form&source=bl&ots=\\_gi3lBZVgJ&sig=Zcxa-SFw-GopVhb3CUkwwkBgs9o&hl=pt-PT&sa=X&ved=2ahUKEwjUoajB4JTeAhXqBcAKHeHqAYE4ChDoATABegQIBxAB#v=onepage&q=final%20energy%20form&f=false](https://books.google.pt/books?id=JPjqRIIWHcoC&pg=PA287&lpg=PA287&dq=final+energy+form&source=bl&ots=_gi3lBZVgJ&sig=Zcxa-SFw-GopVhb3CUkwwkBgs9o&hl=pt-PT&sa=X&ved=2ahUKEwjUoajB4JTeAhXqBcAKHeHqAYE4ChDoATABegQIBxAB#v=onepage&q=final%20energy%20form&f=false)
5. ADENE. Boas Práticas. Consultado em setembro, 2018, em: <https://www.adene.pt/comportamentos/>
6. IEA Publications (2017). *Energy Efficiency Indicators – Highlights*. França
7. LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia – Investigação para a Sustentabilidade. *Networks*. Consultado em setembro, 2018, em: <http://www.lneg.pt/networks/7>
8. IEA Publications (2017). *Market Report Series - Energy Efficiency 2017*. França
9. The World Foundry Organization (2017). *Census of world casting production – Global casting production growth stalls*.
10. CAEF – The European Foundry Association – *Statistics*. Consultado em setembro, 2018, em: <https://www.caef.eu/en/statistics/>
11. Associação Portuguesa de Fundição. *Números do setor*. Consultado em setembro, 2018 em: <http://apf.com.pt/about-3/>
12. CAEF – The European Foundry Association – *Downloads: Foundries ferrous*. Consultado em setembro, 2018, em <https://www.caef.eu/assets/files/downloadable/3.pdf?v=1.0.112>
13. CAEF – The European Foundry Association – *Downloads: Foundries non-ferrous*. Consultado em setembro, 2018, em: <https://www.caef.eu/assets/files/downloadable/4.pdf?v=1.0.112>
14. CAEF – The European Foundry Association – *Downloads: Production ferrous*. Consultado em setembro, 2018, em <https://www.caef.eu/assets/files/downloadable/1.pdf?v=1.0.112>

15. CAEF – The European Foundry Association – *Downloads: Production non - ferrous*. Consultado em setembro, 2018, em <https://www.caef.eu/assets/files/downloadable/2.pdf?v=1.0.112>
16. Salonitis, K; Jolly R.M; Zeng B; Mehrabi, H. (2016). *Improvements in energy consumption and environmental impact by novel single shot melting process for casting*, *Journal of Cleaner Production* – no 137. Manufacturing Department, Cranfield University, UK. Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616308526>
17. Energy Star (2016). *Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Metal Casting*. Disponível em: <https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Metal%20Casting%20Energy%20Guide.pdf>
18. Salonitis, K; Jolly R.M; Zeng B; Mehrabi, H. (2016). *The challenges for energy eficiente casting processes*. Manufacturing Department, Cranfield University, UK. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116000585>
19. Engineers Edge. *Casting Definitions and Terminology*. Consultado em setembro, 2018, em: [https://www.engineersedge.com/casting\\_definition.htm](https://www.engineersedge.com/casting_definition.htm)
20. Porfic – Fundição Injetada de Portugal. *Empresa*. Consultado em fevereiro, 2018 em: <http://www.porfic.com>
21. Porfic – Fundição Injetada de Portugal. *Produção*. Consultado em fevereiro, 2018 em <http://www.porfic.com/pag/sectores>
22. Porfic – Fundição Injetada de Portugal. *Serviços*. Consultado em fevereiro, 2018 em <http://www.porfic.com/pag/servicos>
23. Ordem dos Engenheiros. *A Fundição Injetada de Alumínio: Princípios e Desafios*. Disponível em: [http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier\\_artigo/fundicaoinjectadaprincipiosedesafios\\_1\\_1208287684533548e9ec8a0.pdf](http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/fundicaoinjectadaprincipiosedesafios_1_1208287684533548e9ec8a0.pdf)
24. Verran, Guilherme, O. *Processos de Fundição Sob Pressão*. Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Florianópolis. Disponível em: [http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/verran/materiais/Aula\\_05\\_Fundicao\\_Sob\\_Pressao.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/verran/materiais/Aula_05_Fundicao_Sob_Pressao.pdf)
25. Borges, M. *Fundição*. Consultado em março, 2018, em: [http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont\\_html/fundicao.htm](http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/fundicao.htm)
26. ADENE – SGCIE (Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia) (2018). *Enquadramento e Objetivos*. Consultado em fevereiro, 2018, em: <http://sgcie.publico.adene.pt/SGCIE/Paginas/Enquadramento.aspx>

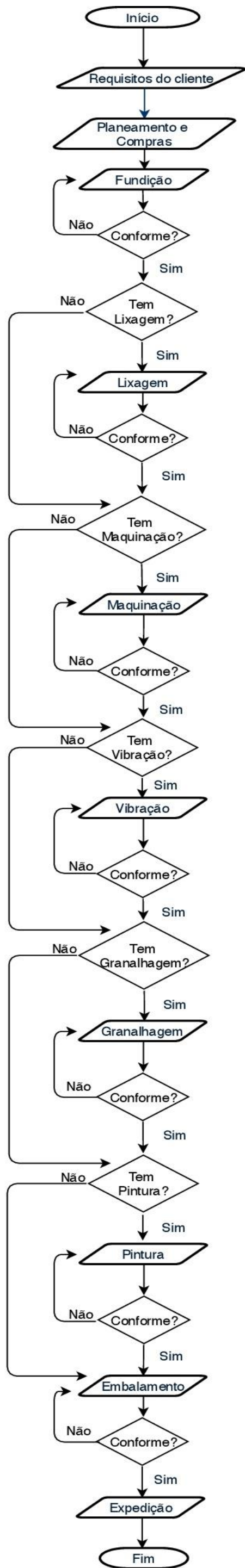
27. Despacho nº17313/2008 de 26 de junho. *Diário da República* nº122 - 2ª série.  
Ministério da economia e da inovação
28. Decreto-Lei nº71/2008 de 15 de abril. *Diário da República* nº 74- 1ª série.  
Ministério da economia e da inovação
29. Portaria nº117-A/2008 de 8 de fevereiro. *Diário da República* nº28 - 1ª série.  
Ministério das finanças e da administração pública e da agricultura do desenvolvimento rural e das pescas
30. ERSE. PPEC 2017-2018. Consultado em maio, 2018 em:  
<http://www.erse.pt/pt/planodepromocaodaeficiencianoconsumoppec/ppec17-18/Paginas/MedidasIndustria.aspx>
31. Iberdrola. *Guia de Eficiência Energética - Manual de boas práticas*. Disponível em:  
[https://www.iberdrola.pt/02sicb/gc/prod/en\\_US/aboutus/docs/MANUAL\\_BOAS\\_PRACTICAS.pdf](https://www.iberdrola.pt/02sicb/gc/prod/en_US/aboutus/docs/MANUAL_BOAS_PRACTICAS.pdf)
32. Energias Renováveis. *Galp Energy Manager*. Consultado em março, 2018 em:  
<https://www.xn--energiasrenovveis-jpb.com/eficiencia-energetica/programa-galp-energy-manager/>
33. EPMF Engenharia. *Energia Reativa*. Consultado em maio, 2018 em:  
<https://www.epmf.pt/energia-reactiva/>
34. Galp. *O que é a Energia Reativa?* Consultado em maio, 2018 em:  
<https://casa.galp.pt/ajuda/energias-galp/o-que-e-energia-reactiva>
35. Infocontrol. *Correção do fator de potência*. Consultado em maio, 2018 em:  
[https://www.infocontrol.pt/gestao-de-energia-e-eficiencia-energetica/correcao-do-fator-de-potencia/?gclid=CjwKCAjwopTYBRAzEiwAnU4kb7YIJc2uCKTZsMIb0zlbsZA6DwcJTgip8EmXOffK38-I\\_iV7AzDHRBoCLFsQAvD\\_BwE](https://www.infocontrol.pt/gestao-de-energia-e-eficiencia-energetica/correcao-do-fator-de-potencia/?gclid=CjwKCAjwopTYBRAzEiwAnU4kb7YIJc2uCKTZsMIb0zlbsZA6DwcJTgip8EmXOffK38-I_iV7AzDHRBoCLFsQAvD_BwE)
36. Oliveira, M. (2016) Apontamentos da cadeira de Gestão de Energia. Universidade de Aveiro
37. ERSE. *Glossário*. Consultado em setembro, 2018, em:  
<http://www.erse.pt/pt/glossario/Paginas/glossario.aspx?folder=baeaae46-4f3f-401d-91ff-668518dd41e8>
38. Wikipédia. *Fator de Potência*. Consultado em maio, 2018 em:  
[https://pt.wikipedia.org/wiki/Fator\\_de\\_pot%C3%Aancia](https://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%Aancia)
39. Coelba. *Energia Reativa*. Consultado em março, 2018 em:  
<http://www.coelba.com.br/Pages/Servi%E7o%20ao%20Cliente%20Old/Residencial/energia-reactiva.aspx>

40. Despacho nº7253/2010 de 26 de abril. *Diário da República* nº80 - 2ª série. Entidade reguladora dos serviços energéticos.
41. Gerador de Preços. *Homepage*. Consultado em maio, 2018 em: [http://www.geradordeprecos.info/obra\\_nova/Instalacoes/Electricas/IEQ\\_Equipamentos\\_para\\_corrigir\\_o\\_f/Bateria\\_de\\_condensadores.html](http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Instalacoes/Electricas/IEQ_Equipamentos_para_corrigir_o_f/Bateria_de_condensadores.html)
42. Motorcontrol. *Benefícios de um variador de velocidade*. Consultado em maio, 2018 em: <http://motorcontrol.pt/quais-os-beneficios-de-um-variador-de-velocidade>
43. Bergman, Theodore L; Lavine, Adrienne S; Incropera, Frank P; Dewitt, David P (2014) *Fundamentos de transferência de calor e de massa* – 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC
44. Engineering Tolbox . *Convective Heat Transfer*. Consultado em junho, 2018 em: [https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d\\_430.html](https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html)
45. Calculator Edge. *Thermal Conductivity of Materials*. Consultado em junho, 2018 em: <http://www.calculatoredge.com/charts/mthconm.htm>
46. Ceramic Industry. *Measuring Thermal Conductivity*. Consultado em junho, 2018 em: <https://www.ceramicindustry.com/articles/84495-measuring-thermal-conductivity>
47. Mikron. *Table of Emissivity of Various Surfaces*. Consultado em junho, 2018 em: [http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229\\_LHC\\_detector\\_analysis/calculations/emissivity2.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf)
48. Omega. *Table of Total Emissivity*. Consultado em junho, 2018 em: <https://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z088-089.pdf>
49. Insertec – Fornos e Refratários. *Refratários para fornos de reverberação*. Consultado em maio, 2018 em: <http://www.insertec.biz/pt/solucoes-refratarias/fundicao-de-aluminio/reverbero>
50. Engineering Tolbox . *Thermal Conductivity of Common Materials and Gases*. Consultado em maio, 2018 em: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)
51. Tungkin Industry - *High Temperature Resistance Glass Wool Board Fire Resistance For Industrial*. Consultado em julho, 2018 em: <http://www.rock-wool-insulation.com/sale-1588507-high-temperature-resistance-glass-wool-board-fire-resistance-for-industrial.html>
52. Saint-Gobain Isover Ibérica (2018). *Lista de preços ISOVER – Janeiro 2018*. Disponível em: <http://orcamentos.eu/tabela-de-precos-isover-isolamentos/>
53. Lalos – Injetoras para Zamac. *O que é Zamac*. Consultado em março, 2018 em: <http://lalos.com.br/o-que-e-zamac/>
54. Eastern Alloys. *Zinc Die Casting Alloys*. Consultado em março, 2018 em: <http://www.eazall.com/zinc-die-casting-alloys>



55. Zincoligas. *Zamac 5*. Consultado em março, 2018 em:  
<http://www.zincoligas.com.br/zamac-5/>
56. MakeltFrom.com. *Euronorm (EN) Cast Aluminium*. Consultado em março, 2018 em:  
<https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-AC-43400-43400-F-AISi10MgFe-Cast-Aluminum>
57. Sabater Fundimol. *Aluminium general tables chemical composition*. Consultado em março de 2018, em: [http://www.sabater-fundimol.com/customers/resources/pdf/sabater-fundimol\\_catalog\\_p92-93.pdf](http://www.sabater-fundimol.com/customers/resources/pdf/sabater-fundimol_catalog_p92-93.pdf)
58. Dynacast. *Aluminium – 44300*. Consultado em março, 2018, em:  
<https://www.dynacast.co.uk/aluminium-44300>
59. Dynacast. *Aluminium – 46000*. Consultado em março, 2018, em:  
<https://www.dynacast.co.uk/aluminium-46000>
60. Mata, D. (2018). *Tabela de conversões para clientes de GPL*.







## Anexo B – Propriedades das ligas de zamak e de alumínio

Este anexo tem como objetivo complementar a Secção 1.3.2 do presente relatório, estabelecendo uma comparação entre as propriedades físicas e composição dos dois tipos de liga utilizados pela empresa.

### Ligas de zamak

**O zinco**, elemento dominante na liga, é um metal relativamente denso e compacto, que confere à liga elevada densidade e durabilidade. As ligas de zinco destinadas a fundição apresentam uma elevada resistência mecânica [53].

**O alumínio** apresenta-se como o elemento mais eficiente para se acrescentar ao zinco, para aumentar a fluidez da liga. Devido a propriedades como a sua leveza, a elevada resistência mecânica, dureza ou a resistência à corrosão, este elemento contribui significativamente para que a liga apresente uma estrutura mais robusta [53].

**O magnésio** representa uma menor percentagem da liga, sendo utilizado com o objetivo de reduzir os efeitos das impurezas metálicas e da corrosão intergranular. Este elemento confere ainda uma maior dureza à liga, reduzindo ligeiramente a sua ductilidade [53].

**O cobre** aumenta a resistência mecânica da liga, bem como a sua dureza e tensão de cedência, prevenindo a deformação plástica. Este elemento contribui para que a liga apresente elevada resistência à corrosão [53].

A Tabela 37 ilustra as diferenças entre os 3 tipos de liga de zamak, a nível de propriedades físicas e mecânicas, enquanto que a Figura 46 estabelece uma comparação entre as composições químicas das ligas 3 e 5, utilizadas na empresa.

## Anexo B – Propriedades das ligas de zamak e de alumínio

Tabela 37 - Propriedades das ligas de zamak. Fonte: [54]

| Propriedades Mecânicas                                       | Zamak 3 | Zamak 5 | Zamak 2 |
|--|---------|---------|---------|
| Resistência à tração - <i>MPa</i>                            | 283     | 328     | 359     |
| Tensão de cedência (tração) - 0.2% Offset - <i>MPa</i>       | 221     | 269     | 283     |
| Deformação: % em 2"  | 10      | 7       | 7       |
| Tensão de corte - <i>MPa</i>                                 | 214     | 262     | 317     |
| Dureza de Brinell  | 82      | 91      | 100     |
| Resistência ao impacto - <i>J</i>                            | 58      | 65      | 48      |
| Resistência à fadiga - <i>MPa</i>                            | 48      | 57      | 59      |
| Tensão de cedência (compressão) 0.1% Offset - <i>MPa</i>     | 414     | 600     | 641     |
| Módulo de Young - <i>GPa</i>                                 | 85,5    | 85,5    | 85,5    |
| Coeficiente de Poisson                                       | 0,27    | 0,27    | 0,27    |
| Propriedades Físicas   | Zamak 3 | Zamak 5 | Zamak 2 |
| Densidade - <i>g/cm³</i>                                     | 6,6     | 6,6     | 6,6     |
| Intervalo de fusão - °C                                      | 381-387 | 380-386 | 379-390 |
| Condutividade térmica: <i>W/m.K</i>                          | 113,0   | 108,9   | 104,7   |
| Coeficiente de expansão térmica: 100-200°C - <i>µm/mm/°C</i> | 27,4    | 27,4    | 27,8    |
| Calor específico - <i>J/kg/°C</i>                            | 419     | 419     | 419     |
| Calor latente (de fusão) - <i>kJ/kg</i>                      |         | 110     |         |

| COMPOSIÇÃO QUÍMICA |                 |         |        |         |        |
|--------------------|-----------------|---------|--------|---------|--------|
| ELEMENTO           |                 | ZAMAC 5 |        | ZAMAC 3 |        |
|                    |                 | MÍNIMO  | MÁXIMO | MÍNIMO  | MÁXIMO |
| Al                 | <i>Alumínio</i> | 3.900   | 4.300  | 3.900   | 4.300  |
| Cu                 | <i>Cobre</i>    | 0.700   | 1.100  | 0.000   | 0.100  |
| Mg                 | <i>Magnésio</i> | 0.030   | 0.060  | 0.030   | 0.060  |
| Fe                 | <i>Ferro</i>    | 0.000   | 0.035  | 0.000   | 0.035  |
| Pb                 | <i>Chumbo</i>   | 0.000   | 0.004  | 0.000   | 0.004  |
| Cd                 | <i>Cádmio</i>   | 0.000   | 0.003  | 0.000   | 0.003  |
| Sn                 | <i>Estanho</i>  | 0.000   | 0.0015 | 0.000   | 0.0015 |
| Zn                 | <i>Zinco</i>    | Dif.    | Dif.   | Dif.    | Dif.   |

Figura 46 - Composição química das ligas de zamak. Fonte: [55]

## Ligas de alumínio

À semelhança da metodologia adotada anteriormente, seguem-se duas tabelas ilustrativas das diferenças entre os referidos tipos de liga de alumínio, a nível de propriedades físicas, mecânicas e térmicas (Tabela 38) e composição química (Tabela 39).

Tabela 38 - Propriedades das ligas de alumínio. Fonte: [56]

| Propriedades Mecânicas                          | AlSi10Mg (Fe)<br>(EN 43400) | AlSi12 (Fe)<br>(EN 44300) | AlSi9Cu3 (Fe)<br>(EN 46000) |
|---|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Dureza de Brinell                               | 80                          | 68                        | 91                          |
| Módulo de Young - <i>GPa</i>                    | 72                          | 72                        | 73                          |
| Deformação na rotura - %                        | 1,1                         | 1,1                       | 1                           |
| Resistência à fadiga - <i>MPa</i>               | 110                         | 100                       | 110                         |
| Coeficiente de Poisson                          | 0,33                        | 0,33                      | 0,33                        |
| Tensão de Rotura - <i>GPa</i>                   | 27                          | 27                        | 28                          |
| Resistência à tração - <i>MPa</i>               | 270                         | 270                       | 270                         |
| Tensão de Cedência - <i>MPa</i>                 | 160                         | 150                       | 160                         |
| Propriedades Físicas                            | AlSi10Mg(Fe)<br>(EN 43400)  | AlSi12 (Fe)<br>(EN 44300) | AlSi9Cu3 (Fe)<br>(EN 46000) |
| Intervalo de fusão - °C                         | 550 - 600                   | 570 - 580                 | 500 - 600                   |
| Calor específico - <i>J/kg.K</i>                | 900                         | 900                       | 880                         |
| Coeficiente de expansão térmica - <i>µm/m.K</i> | 22                          | 21                        | 21                          |
| Condutividade Térmica - <i>W/m.K</i>            | 130 - 150                   | 130 - 160                 | 110 - 120                   |
| Densidade - <i>g/cm³</i>                        | 2,6                         | 2,5                       | 2,8                         |

Tabela 39 - Composição química das ligas de alumínio. Fonte: [57]

| Percentagem de elemento químico na composição da liga (%) |             |           |             |      |             |      |      |      |      |      |             |
|---|-------------|-----------|-------------|------|-------------|------|------|------|------|------|-------------|
| Código norma europeia                                     | Si          | Fe        | Cu          | Mn   | Mg          | Cr   | Ni   | Zn   | Pb   | Sn   | Ti          |
| <b>43 400</b>   | 9 a 11      | 0,45 a 1  | 0,08 a 0,10 | 0,55 | 0,2 a 0,5   | -    | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,05 | 0,15 a 0,20 |
| <b>44 300</b>   | 10,5 a 13,5 | 0,45 a 1  | 0,08 a 0,10 | 0,55 | -           | -    | -    | 0,15 | -    | -    | 0,15        |
| <b>46 000</b>   | 8 a 11      | 0,6 a 1,3 | 2 a 4       | 0,55 | 0,05 a 0,55 | 0,15 | 0,55 | 1,2  | 0,35 | 0,25 | 0,20 a 0,25 |

Nota: A restante composição das ligas é atribuída ao elemento alumínio.

As ligas 44300, 43400 e 46000 são utilizadas, geralmente, em processos de fundição sobre pressão (como o caso da fundição injetada) onde se pretendam obter peças com boas propriedades mecânicas. Ambas as ligas se revelam fáceis de maquinar e adequadas a peças com elevada precisão dimensional. A liga 44300 é mais utilizada em situações de tratamentos térmicos e químicos, enquanto que a liga 46000 se revela mais adequada para a obtenção de peças com geometrias complexas [58] [59].

À semelhança do que ocorre com a ligas de zamak, o tipo de liga de alumínio é selecionado em função dos requisitos funcionais da peça, sendo esta escolha determinada pelo cliente.



Anexo C – Levantamento energético e desagregação de consumos

Levantamento das faturas de energia

Tabela 40 - Fornecimento de propano (2017).

| Mês         | ton    | tep    | MWh      | tonCO <sub>2</sub> e |
|-------------|--------|--------|----------|----------------------|
| Janeiro     | 39,44  | 43,64  | 506,17   | 115,10               |
| Fevereiro   | 32,92  | 36,42  | 422,50   | 96,07                |
| Março       | 42,43  | 46,94  | 544,48   | 123,81               |
| Abril       | 33,78  | 37,37  | 433,46   | 98,56                |
| Maio        | 37,45  | 41,43  | 480,58   | 109,28               |
| Junho       | 37,10  | 41,05  | 476,13   | 108,27               |
| Julho       | 36,63  | 40,52  | 470,06   | 106,89               |
| Agosto      | 13,58  | 15,02  | 174,26   | 39,63                |
| Setembro    | 39,10  | 43,25  | 501,73   | 114,09               |
| Outubro     | 40,41  | 44,71  | 518,61   | 117,93               |
| Novembro    | 39,19  | 43,36  | 502,96   | 114,37               |
| Dezembro    | 23,93  | 26,48  | 307,13   | 69,84                |
| Total anual | 415,95 | 460,18 | 5 338,08 | 1 213,81             |

| Custo anual propano (€) |
|-------------------------|
| 369 438                 |

Tabela 41 - Fatores de conversão utilizados no levantamento.

| Fonte de energia | (tep/kWh) | Custo (€/kWh) | Custo (€/ton) | (kgCO <sub>2</sub> e/tep) | PCI (tep/ton) | PCI (GJ/ton) |
|------------------|-----------|---------------|---------------|---------------------------|---------------|--------------|
| Eletricidade     | 2,15E-04  | 0,12          |               | 2186,05                   |               |              |
| Propano          | 8,621E-05 |               | 900           | 2637,7                    | 1,1063        | 46           |

Tabela 42 - Consumo de energia elétrica (2017).

| Mês       | Ponta (MWh) | Cheio (MWh) | Vazio (MWh) | Super vazio (MWh) | Total energia mensal (MWh) | Total energia mensal (tep) | Total mensal de emissões (tonCO <sub>2</sub> e) | Custo mensal fatura (€) |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|---|-------------------------|
| Janeiro   | 25,88       | 65,71       | 17,08       | 11,21             | 119,87                     | 25,77                      | 56,34   | 17 252,66               |
| Fevereiro | 20,96       | 54,36       | 16,05       | 9,69              | 101,06                     | 21,73                      | 47,50   | 14 481,07               |
| Março     | 25,71       | 71,56       | 17,72       | 11,06             | 126,05                     | 27,10                      | 59,24   | 18 277,54               |
| Abril     | 14,70       | 59,94       | 16,77       | 9,50              | 100,91                     | 21,70                      | 47,43   | 15 257,44               |
| Maio      | 18,54       | 73,19       | 15,85       | 10,95             | 118,54                     | 25,49                      | 55,71   | 17 642,13               |
| Junho     | 19,13       | 72,39       | 18,47       | 12,02             | 122,02                     | 26,23                      | 57,35   | 18 169,35               |
| Julho     | 18,89       | 74,09       | 16,45       | 11,06             | 120,48                     | 25,90                      | 56,62   | 18 145,69               |
| Agosto    | 8,29        | 29,60       | 6,19        | 5,46              | 49,54                      | 10,65                      | 23,28   | 7 793,69                |
| Setembro  | 19,44       | 77,16       | 15,73       | 1,22              | 113,56                     | 24,41                      | 53,37   | 18 734,78               |
| Outubro   | 20,42       | 78,38       | 2,02        | 12,91             | 113,73                     | 24,45                      | 53,45   | 19 411,68               |
| Novembro  | 29,41       | 75,69       | 19,54       | 14,41             | 139,05                     | 29,90                      | 65,35   | 20 072,95               |
| Dezembro  | 18,26       | 45,63       | 15,33       | 9,83              | 89,06                      | 19,15                      | 41,86   | 13 358,03               |
| Total     | 239,62      | 777,70      | 177,21      | 119,32            | 1 313,85                   | 282,48                     | 617,51  | 198 597,01              |

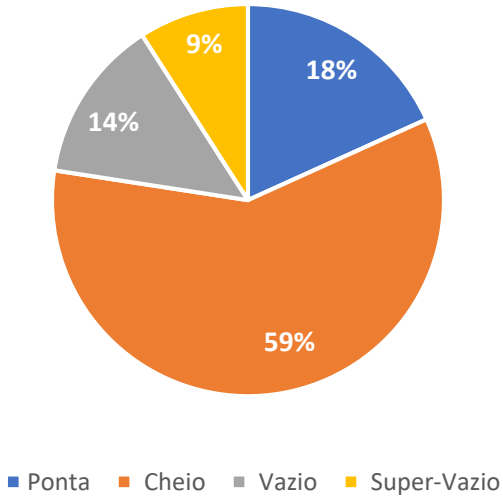


Gráfico 11 - Distribuição anual do consumo de eletricidade pelos diferentes períodos.



Desagregação de consumos de energia elétrica

Iluminação

Tabela 43 - Levantamento dos equipamentos de iluminação.

| Sala (nº de salas)                | Tipo de luminária na sala | Potência (kW) | Nº luminárias | Horas diárias | Dias por semana | Semanas por ano | Nº lâmpadas por luminária | Consumo anual luminária (kWh) | Consumo anual sala (MWh) |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Pavilhão Máquinas Injeção (1)     | fluorescente              | 0,10          | 38            | 8             | 5               | 48              | 1                         | 7 004,16                      | 7,77                     |
|                                   | tubular simples           | 0,08          | 5             | 8             | 5               | 48              | 1                         | 768                           |                          |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| Pavilhão Pintura e Maquinação (1) | fluorescente              | 0,10          | 33            | 8             | 5               | 48              | 1                         | 6 082,56                      | 13, 76                   |
|                                   | tubular simples           | 0,08          | 26            | 8             | 5               | 48              | 1                         | 3 993,6                       |                          |
|                                   | tubular dupla             | 0,08          | 12            | 8             | 5               | 48              | 2                         | 3 686,4                       |                          |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| Oficina (1)                       | fluorescente              | 0,10          | 8             | 8             | 5               | 48              | 1                         | 1 474,56                      | 3, 62                    |
|                                   | tubular simpes            | 0,08          | 2             | 8             | 5               | 48              | 1                         | 307,2                         |                          |
|                                   | tubular dupla             | 0,08          | 6             | 8             | 5               | 48              | 2                         | 1 843,2                       |                          |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| Gabinetes (6)                     | tubular quádrupla         | 0,018         | 5             | 8             | 5               | 48              | 4                         | 4 147,2                       | 4,15                     |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| Entrada (1)                       | tubular dupla             | 0,025         | 2             | 2             | 5               | 48              | 2                         | 48                            | 0,05                     |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| Sala Refeições (1)                | tubular quádrupla         | 0,018         | 7             | 1             | 5               | 24              | 4                         | 60,48                         | 0,06                     |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| Sala Expedição (1)                | tubular dupla             | 0,08          | 20            | 4             | 5               | 48              | 2                         | 1 536                         | 1,54                     |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| Balneários (2)                    | tubular dupla             | 0,025         | 3             | 4             | 5               | 48              | 2                         | 288                           | 0,29                     |
|                                   |                           |               |               |               |                 |                 |                           |                               |                          |
| WC (2)                            | tubular quádrupla         | 0,018         | 1             | 2             | 5               | 48              | 4                         | 69,12                         | 0,07                     |



Máquinas

(Energia elétrica associada à força motriz utilizada nos equipamentos)

Tabela 44 - Levantamento das máquinas.

| Grupo                |                            | Designação                                       | Potência média funcionamento (kW) | Horas diárias | Dias por semana | Semanas por ano | Consumo individual anual (MWh) | Consumo anual grupo (MWh) |
|----------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|
| Máquinas de Injecção | Código Máquina             |  |                                   |               |                 |                 |                                | 726,79                    |
|                      | Zamak (eléctrica)          | F01  | Buhler Z250                       | 21            | 11              | 5               | 48                             | 55,4                      |
|                      | Zamak (gás)                | F02  | Frech DAW 80                      | 5,5           | 12              | 5               | 48                             | 15,84                     |
|                      | Alumínio (gás)             | F04  | MBS DK 100                        | 16,5          | 11              | 5               | 48                             | 43,56                     |
|                      | Alumínio (gás)             | F05  | Pretransa PT3200                  | 16,5          | 11              | 5               | 48                             | 43,56                     |
|                      | Alumínio (gás)             | F07  | Pretransa PT3200                  | 16,5          | 11              | 5               | 48                             | 43,56                     |
|                      | Alumínio (gás)             | F08  | Pretransa PT3200                  | 16,5          | 11              | 5               | 48                             | 43,56                     |
|                      | Alumínio (gás)             | F10  | Pretransa PT3200                  | 16,5          | 11              | 5               | 48                             | 43,56                     |
|                      | Alumínio (gás)             | F11  | Pretransa PT3200                  | 16,5          | 11              | 5               | 48                             | 43,56                     |
|                      | Alumínio (gás)             | F13  | Colosio 750                       | 16,5          | 11              | 5               | 48                             | 43,56                     |
|                      | Alumínio (eléctrica)       | F14  | Colosio 500                       | 32            | 11              | 5               | 48                             | 84,48                     |
|                      | Forno Fusor alumínio (gás) | FF01   | Striko Westofen                   | 16,5          | 24              | 7               | 48                             | 133,06                    |
|                      | Forno Fusor alumínio (gás) | FF02   | Botta                             | 16,5          | 24              | 7               | 48                             | 133,06                    |
|                      |                            |  |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| Granalhadora         | Código Máquina             |  |                                   |               |                 |                 |                                | 11,63                     |
|                      | G01                        | CM surface treatment MT/1000 Coniex              | 8,07                              | 6             | 5               | 48              | 11,63                          |                           |
| Lixadoras            | Código Máquina             |  |                                   |               |                 |                 |                                | 55,85                     |
|                      | L01                        | Dan techonlogy de antoni N.2 (Centro automático) | 14,5                              | 8             | 5               | 48              | 27,84                          |                           |
|                      | L02                        | Lixadora   | 2,75                              | 6             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                      | L03                        | Lixadora de lamela                               | 0,1                               | 6             | 5               | 48              | 0,14                           |                           |
|                      | L04                        | Lixadora   | 2,75                              | 6             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                      | L05                        | Lixadora   | 2,75                              | 6             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                      | L06                        | Lixadora portátil                                | 0,1                               | 6             | 5               | 48              | 0,14                           |                           |
|                      | L07                        | Lixadora   | 2,75                              | 6             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                      | L08                        | Lixadora   | 2,75                              | 6             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                      | L09                        | Lixadora   | 2,75                              | 6             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                      | L10                        | Lixadora   | 2,75                              | 6             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                      |                            |  |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| Polidores            | Código Máquina             |  |                                   |               |                 |                 |                                | 7,48                      |
|                      | POL 01                     | Polidor  | 2,6                               | 6             | 5               | 48              | 3,74                           |                           |
|                      | POL 02                     | Polidor  | 2,6                               | 6             | 5               | 48              | 3,74                           |                           |



Tabela 45 - Levantamento das máquinas (continuação).

| Grupo                |                | Designação                                | Potência média funcionamento (kW) | Horas diárias | Dias por semana | Semanas por ano | Consumo individual anual (MWh) | Consumo anual grupo (MWh) |
|----------------------|----------------|---|-----------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|
| Furadoras            | Código Máquina |   |                                   |               |                 |                 |                                | 57,60                     |
|                      | M01            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M02            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M03            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M04            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M05            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M06            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M07            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M08            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M09            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M10            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M11            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M12            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M13            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M14            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M15            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M16            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M17            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M18            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M19            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      | M20            | Furadora                                  | 0,2                               | 6             | 5               | 48              | 2,88                           |                           |
|                      |                |   |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| Prensas              | Código Máquina |   |                                   |               |                 |                 |                                | 33,12                     |
|                      | PR02           | Mini - prensa                             | 4                                 | 6             | 5               | 48              | 5,76                           |                           |
|                      | PR03           | Prensa                                    | 5,5                               | 6             | 5               | 48              | 7,92                           |                           |
|                      | PR04           | Mini - prensa pneumática                  | 4                                 | 6             | 5               | 48              | 5,76                           |                           |
|                      | PR05           | Mini - prensa pneumática                  | 4                                 | 6             | 5               | 48              | 5,76                           |                           |
|                      | PR06           | Prensa                                    | 5,5                               | 6             | 5               | 48              | 7,92                           |                           |
|                      |                |   |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| Máquinas de Vibração | Código Máquina |   |                                   |               |                 |                 |                                | 61,34                     |
|                      | V02            | Rosler italiana ST22TR                    | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | V03            | Rosler italiana ST22TR                    | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | V05            | Rosler italiana ST22TR                    | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | V06            | Rosler italiana ST22TR                    | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | V07            | Passadeira rolante                        | 4,88                              | 8             | 5               | 48              | 9,36                           |                           |
|                      | V08            | Máquina de vibração a seco                | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | V09            | Máquina de vibração                       | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | V10            | Máquina de vibração                       | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | V12            | Máquina de vibração a seco                | 3,25                              | 8             | 5               | 48              | 6,24                           |                           |
|                      | SE01           | Máquina de serração Mosner Rekord SSF 420 | 1,43                              | 6             | 5               | 48              | 2,06                           |                           |





Tabela 46 - Levantamento das máquinas (continuação).

| Grupo              |                | Designação                            | Potência média funcionamento (kW) | Horas diárias | Dias por semana | Semanas por ano | Consumo individual anual (MWh) | Consumo anual grupo (MWh) |
|--------------------|----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|
| Oficina            | Código Máquina |                                       |                                   |               |                 |                 |                                | 8,22                      |
|                    | OF02           | Engenho de furar Bergonzi (de coluna) | 0,375                             | 3             | 5               | 48              | 0,27                           |                           |
|                    | OF05           | Rectificadora Elb Werkzeug            | 5,5                               | 3             | 5               | 48              | 3,96                           |                           |
|                    | OF06           | Esmeriladora Saacke                   | 0,375                             | 3             | 5               | 48              | 0,27                           |                           |
|                    | OF07           | Esmeriladora Deckel                   | 0,375                             | 3             | 5               | 48              | 0,27                           |                           |
|                    | OF08           | Esmeriladora Femi                     | 0,375                             | 3             | 5               | 48              | 0,27                           |                           |
|                    | OF09           | Fresadora maximart                    | 1,75                              | 3             | 5               | 48              | 1,26                           |                           |
|                    | OF10           | Fresadora maximart                    | 1,75                              | 3             | 5               | 48              | 1,26                           |                           |
|                    | OF11           | Máquina de erosão VGA ZNC             | 0,185                             | 3             | 5               | 48              | 0,13                           |                           |
|                    | OF12           | Máquina de erosão Js EDM M606N        | 0,185                             | 3             | 5               | 48              | 0,13                           |                           |
|                    | OF13           | Serrote de fita Africorte             | 0,55                              | 3             | 5               | 48              | 0,40                           |                           |
|                    |                |                                       |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| CNC's              | Código Máquina |                                       |                                   |               |                 |                 |                                | 84,86                     |
|                    | OF14           | MAS MCV 1000                          | 22,75                             | 8             | 5               | 48              | 43,68                          |                           |
|                    | OF15           | Perfect Jet MCV M7                    | 7,15                              | 8             | 5               | 48              | 13,73                          |                           |
|                    | EB01           | Brother TC 22A                        | 7,15                              | 8             | 5               | 48              | 13,73                          |                           |
|                    | EB02           | Brother TC 22A                        | 7,15                              | 8             | 5               | 48              | 13,73                          |                           |
| Sala das refeições |                |                                       |                                   |               |                 |                 |                                | 0,81                      |
|                    |                | TV                                    | 0,75                              | 1             | 5               | 48              | 0,18                           |                           |
|                    |                | Microondas                            | 0,12                              | 1             | 5               | 48              | 0,03                           |                           |
|                    |                | Microondas                            | 0,12                              | 1             | 5               | 48              | 0,03                           |                           |
|                    |                | Frigorífico                           | 0,1                               | 24            | 5               | 48              | 0,58                           |                           |
|                    |                |                                       |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| Pintura            | Código Máquina |                                       |                                   |               |                 |                 |                                | 28,3                      |
|                    | P01            | Túnel de cozedura Fimel               | 11,8                              | 10            | 5               | 48              |                                |                           |
|                    | P02            | Sistema de tratamento químico Fimel   |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
|                    | P03            | Túnel de Secagem Fimel                |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
|                    |                |                                       |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| Pontes Rolantes    | Código Máquina |                                       |                                   |               |                 |                 |                                | 0,84                      |
|                    | SF15           | Metalmaco 6,3 ton                     | 0,22                              | 8             | 5               | 48              | 0,42                           |                           |
|                    | SF13           | Metalmaco 3,2 ton                     | 0,22                              | 8             | 5               | 48              | 0,42                           |                           |
|                    |                |                                       |                                   |               |                 |                 |                                |                           |
| Ar comprimido      | Código Máquina |                                       |                                   |               |                 |                 |                                | 277                       |
|                    | ET01           | Compressor Boge S60                   | 34,29                             | 24            | 7               | 48              | 276, 51                        |                           |
|                    | ET02           | Compressor Boge S8                    | 0,825                             | 2             | 5               | 15              | 0,12                           |                           |
|                    | ET04           | Compressor Atlas GA15                 | 2,25                              | 2             | 5               | 15              | 0,34                           |                           |
|                    | ET05           | GMI PAD 0043 Tercame                  | 3,21                              | 2             | 2               | 2               | 0,026                          |                           |



Desagregação de consumos de propano

Tabela 47 - Levantamento dos queimadores.

| Código Máquina | Localização do queimador             | Designação do queimador        | P média funcionamento (kW) | Horas diárias | Dias por semana | Semanas por ano | Consumo individual anual (MWh) | Consumo individual anual (ton propano) |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--|
| F04            | Forno de máquina de injeção Alumínio | Joannes G35                    | 55                         | 11            | 5               | 48              | 145,2                          | 11,31                                  |
| F05            | Forno de máquina injeção Alumínio    | Joannes G35                    | 55                         | 11            | 5               | 48              | 145,2                          | 11,31                                  |
| F08            | Forno de máquina de injeção Alumínio | Ecoflam Blu 500 PAB            | 85                         | 11            | 5               | 48              | 224,4                          | 17,49                                  |
| F07            | Forno de máquina de injeção Alumínio | Ecoflam Blu 500 PAB            | 85                         | 11            | 5               | 48              | 224,4                          | 17,49                                  |
| F10            | Forno de máquina de injeção Alumínio | Ecoflam Blu 500 PAB            | 85                         | 11            | 5               | 48              | 224,4                          | 17,49                                  |
| F11            | Forno de máquina de injeção Alumínio | Ecoflam Blu 500 PAB            | 85                         | 11            | 5               | 48              | 224,4                          | 17,49                                  |
| F13            | Forno de máquina de injeção Alumínio | Ecoflam Blu 500 PAB            | 85                         | 11            | 5               | 48              | 224,4                          | 17,49                                  |
| F02            | Forno de máquina de injeção de Zamak | Elco Klockner vectron VG 2.200 | 100                        | 12            | 5               | 48              | 288                            | 22,44                                  |
| FF01           | Forno Fusor (gás) - alumínio         | StrikoWestofen                 | 250                        | 24            | 7               | 48              | 2 016                          | 157,09                                 |
| FF02           | Forno Fusor (gás) - alumínio         | Botta                          | 150                        | 24            | 7               | 48              | 1 209, 6                       | 94,25                                  |
| P01, P02, P03  | Linha de Pintura                     | Linha de Pintura               | 170                        | 10            | 5               | 48              | 408                            | 31,79                                  |



## Anexo D – Variação da densidade de propano em função da pressão de serviço

Na Porfic, os equipamentos de propano operam a baixa pressão. No entanto, a pressão de serviço não é constante em toda a linha, estando o seu valor dependente do equipamento operante.

Desta forma, existem na empresa diversos redutores, responsáveis pelo decréscimo do valor de pressão proveniente do depósito de propano (1,8 *bar*) até ao valor de pressão de serviço (50 *mbar* no caso do forno fusor FF01 e 37 *mbar* nos restantes equipamentos).

A variação de densidade do propano com a pressão de serviço pode ser traduzida pela equação seguinte, onde  $P_s$  é a pressão de serviço e  $P_{atm}$  a pressão atmosférica (cerca de 1 *bar*) [60].

$$\rho = 2 * \left( \frac{P_s + P_{atm}}{P_{atm}} \right) [kg/m^3]$$

Ao longo deste trabalho foram feitas monitorizações de diversos equipamentos. Para efeitos de coerência e credibilidade dos respetivos cálculos, a pressão de serviço do equipamento foi sempre tida em consideração. O valor de densidade do propano foi, em cada caso, obtido através da referida equação.



## Anexo E – Proposta de aquisição de uma bateria de condensadores

Tabela 48 - Dados de faturação de energia reativa na empresa.

|           | TR1 (x 0,33) |          | TR2 (x 1) |          | TR3 (x 3) |          |                   |        |        |          |                   |           |           |              |
|-----------|--------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-------------------|--------|--------|----------|-------------------|-----------|-----------|--------------|
| Mês       | kvarh        | €        | kvarh     | €        | kvarh     | €        | Total mensal (€)  | cos Φ1 | Φ1 (°) | tan (Φ1) | P contratada (kW) | Q1 (kvar) | Q2 (kvar) | Qc (kvar)    |
| Janeiro   | 8 753,60     | 83,77 €  | 6 808,40  | 197,44 € | 224,00    | 19,49 €  | 300,70 €          | 0,900  | 25,84  | 0,484    | 352               | 170,368   | 105,6     | 64,77        |
| Fevereiro | 7 098,90     | 67,94 €  | 6 237,50  | 180,89 € | 671,50    | 58,42 €  | 307,25 €          | 0,900  | 25,84  | 0,484    | 352               | 170,368   | 105,6     | 64,77        |
| Março     | 9 309,20     | 89,09 €  | 8 435,00  | 244,62 € | 1 342,00  | 116,75 € | 450,46 €          | 0,900  | 25,84  | 0,484    | 360               | 174,24    | 108       | 66,24        |
| Abril     | 7 464,40     | 71,43 €  | 6 527,40  | 189,29 € | 1 522,00  | 135,02 € | 395,74 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 360               | 184,32    | 108       | 76,32        |
| Maio      | 9 148,70     | 87,55 €  | 8 248,70  | 239,21 € | 855,50    | 74,43 €  | 401,19 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 372               | 190,464   | 111,6     | 78,86        |
| Junho     | 9 139,50     | 87,47 €  | 8 625,60  | 250,14 € | 1 600,00  | 139,20 € | 476,81 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 380               | 194,56    | 114       | 80,56        |
| Julho     | 9 297,50     | 88,98 €  | 9 028,50  | 261,83 € | 1 332,50  | 115,93 € | 466,74 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 380               | 194,56    | 114       | 80,56        |
| Agosto    | 3 328,20     | 31,85 €  | 3 125,60  | 90,64 €  | 610,00    | 53,07 €  | 175,56 €          | 0,900  | 25,84  | 0,484    | 380               | 183,92    | 114       | 69,92        |
| Setembro  | 9 660,10     | 92,45 €  | 9 422,10  | 273,24 € | 2 499,50  | 217,46 € | 583,15 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 380               | 194,56    | 114       | 80,56        |
| Outubro   | 9 879,60     | 94,55 €  | 9 284,60  | 269,25 € | 998,00    | 86,83 €  | 450,63 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 400               | 204,8     | 120       | 84,80        |
| Novembro  | 10 481,90    | 100,31 € | 9 578,00  | 277,76 € | 1 055,00  | 91,79 €  | 469,86 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 412               | 210,944   | 123,6     | <b>87,34</b> |
| Dezembro  | 6 310,10     | 60,39 €  | 6 187,00  | 179,42 € | 1 490,00  | 129,63 € | 369,44 €          | 0,890  | 27,13  | 0,512    | 412               | 210,944   | 123,6     | 87,34        |
|           |              |          |           |          |           |          | <b>4 847,53 €</b> |        |        |          |                   |           |           |              |

### Equações utilizadas:

$$\Phi_1 = \arccos(\cos \Phi_1) \quad \Phi_2 = 16,69^\circ$$

$$Q_1 = P_{contratada} * \tan(\Phi_1) \quad \tan(\Phi_2) = 0,3$$

$$Q_2 = P_{contratada} * \tan(\Phi_2)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

**Nota:** TR1, TR2 e TR3 referem-se aos escalões 1, 2 e 3 de faturação de energia reativa indutiva.

Os escalões são definidos pelo valor de  $\tan \emptyset$ . Assim:

Escalão 1:  $0,3 \leq \tan \emptyset < 0,4$ , onde se aplica um fator multiplicativo, relativamente ao preço de referência de energia reativa, de 0,33.

Escalão 2:  $0,4 \leq \tan \emptyset < 0,5$ , onde se aplica um fator multiplicativo de 1.

Escalão 3:  $\tan \emptyset \geq 0,5$ , onde se aplica um fator multiplicativo de 3.





Anexo F - Análise Propano Vs Eletricidade

Zamak

Tabela 49 - Estudo de custo específico de energia para a máquina F01.

| Máquina F01 (zamak – eletricidade) (Sistema de injeção + Forno) |                         |                           |                        |                    |                      |                            |                         |                               |   |
|---|-------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|---|
| Peças produzidas  | Nº de peças por injeção | Nº de injeções da máquina | Nº de peças produzidas | Massa da peça (kg) | Metal produzido (kg) | P média funcionamento (kW) | E média consumida (kWh) | Custo de energia elétrica (€) | Custo específico de energia elétrica (€/kg) |
| Manípulo  | 1                       | 1162                      | 1162                   | 0,36               | 418,32               | 36,29                      | 417,32                  | 50,08                         | 0,12  |

Tabela 50 - Estudo de custo específico de energia elétrica para a máquina F02.

| Máquina F02 (zamak) – componente elétrica (Sistema de injeção) |                         |                        |                        |                    |                      |                            |                               |                               |   |
|--|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Peças produzidas   | Nº de peças por injeção | Nº de injeções máquina | Nº de peças produzidas | Massa da peça (kg) | Metal produzido (kg) | P média funcionamento (kW) | Energia média consumida (kWh) | Custo de energia elétrica (€) | Custo específico de energia elétrica (€/kg) |
| Conjunto Allusion  | 4                       | 860                    | 3440                   | 0,028              | 96,32                | 11,47                      | 45,9                          | 5,51                          | 0,06  |
| Dobradiça 100  | 2                       | 1394                   | 2788                   | 0,054              | 150,55               |                            | 97,53                         | 11,70                         | 0,08  |
| Total  |                         | 2254                   | 6228                   |                    | 246,87               |                            | 143,43                        | 17,21                         | 0,07  |

Tabela 51 - Estudo de custo específico de energia térmica para a máquina F02.

| Máquina F02 (zamak) – componente térmica (Forno) |                                  |                                 |                      |   |
|--|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|---|
| Densidade de propano @37mbar                     | Volume de propano consumido (m³) | Massa de propano consumida (kg) | Custo de propano (€) | Custo específico de propano (€/kg de metal) |
| 2,073  | 36,72                            | 76,12                           | 68,51                | 0,28  |



Alumínio

Tabela 52 - Estudo de custo específico de energia elétrica para o sistema de injeção da máquina F14.

| Máquina <b>F14</b> (alumínio – eletricidade) – Sistema de injeção |                         |                           |                        |                    |                      |                               |                               |                               |   |
|---|-------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Peças produzidas  | Nº de peças por injeção | Nº de injeções da máquina | Nº de peças produzidas | Massa da peça (kg) | Metal produzido (kg) | P média de funcionamento (kW) | Energia média consumida (kWh) | Custo de energia elétrica (€) | Custo específico de energia elétrica (€/kg) |
| Dissipador 700 RL   | 4                       | 701                       | 2804                   | 0,117              | 328,07               | 18,75                         | 206,24                        | 24,75                         | <b>0,08</b>                                 |

Tabela 53 - Estudo de custo específico de energia elétrica para o forno da máquina F14.

| Máquina <b>F14</b> (alumínio – eletricidade) – Forno |                         |                           |                        |                    |                      |                               |                               |                               |   |
|--|-------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Peças produzidas                                     | Nº de peças por injeção | Nº de injeções da máquina | Nº de peças produzidas | Massa da peça (kg) | Metal produzido (kg) | P média de funcionamento (kW) | Energia média consumida (kWh) | Custo de energia elétrica (€) | Custo específico de energia elétrica (€/kg) |
| Refletor 700 Xénon                                   | 2                       | 856                       | 1712                   | 0,5                | 856                  | 19,13                         | 287,02                        | 34,44                         | <b>0,04</b>                                 |

Tabela 54 - Estudo de custo específico de energia elétrica para a máquina F10.

| Máquina <b>F10</b> (alumínio) – Componente elétrica (Sistema de injeção) |                         |                           |                        |                    |                      |                               |                               |                               |   |
|--|-------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Peças produzidas   | Nº de peças por injeção | Nº de injeções da máquina | Nº de peças produzidas | Massa da peça (kg) | Metal produzido (kg) | P média de funcionamento (kW) | Energia média consumida (kWh) | Custo de energia elétrica (€) | Custo específico de energia elétrica (€/kg) |
| Refletor Peugeot   | 4                       | 469                       | 1876                   | 0,25               | 469,00               | 24,48                         | 269,26                        | 32,31                         | <b>0,07</b>                                 |

Tabela 55 - Estudo de custo específico de energia térmica para a máquina F10.

| Máquina <b>F10</b> (alumínio) – Componente térmica (Forno) |                                  |                                 |                      |   |
|--|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|---|
| Densidade de propano @37mbar                               | Volume de propano consumido (m³) | Massa de propano consumida (kg) | Custo de propano (€) | Custo específico de propano (€/kg de metal) |
| 2,073  | 42,79                            | 88,7                            | 79,83                | <b>0,17</b>                                 |

**Nota:** Nos cálculos do custo total (específico) de energia por quilograma de alumínio, considerou-se o acréscimo de 0,03€/kg correspondente ao custo específico de fundição da liga, que ocorre no forno fusor FF01 (Anexo G). Assim, os valores finais são 0,15€/kg (0,08+0,04+0,03) e 0,27€/kg (0,07+0,17+0,03) para as máquinas F14 e F10, respetivamente (Tabela 19 do documento).



## Anexo G – Monitorização do forno fusor FF01

Como referido anteriormente, o processo produtivo das peças de alumínio inicia-se com a fundição dos lingotes nos fornos fusores, que operam de forma contínua.

O forno FF01 assume um papel fundamental no contexto energético da Porfic, uma vez que se apresenta como o maior consumidor de propano da empresa – cerca de 40% do consumo total (Secção 3.2.2 – Gráfico 7).

Desta forma, procedeu-se a um estudo mais aprofundado deste equipamento, com o objetivo de analisar o seu perfil de utilização e os custos associados à fundição de metal.



Figura 47 - Forno Fusor FF01.

O forno fusor FF01 apresenta uma potência nominal de 500 kW, sendo a temperatura máxima da câmara de fusão de 1000 °C. Este equipamento funde apenas uma liga de alumínio - *AlSiMg10* ou *EN 43400*, na norma europeia, e a sua capacidade de carga é de uma tonelada de metal.

Este forno é composto por dois queimadores de propano: um queimador de manutenção e um de fundição.

O queimador de manutenção funciona por *setpoint* de temperatura, ou seja, baseia-se na leitura da temperatura global do equipamento para ligar e desligar, automaticamente. Assim, este queimador procura manter a temperatura de operação do alumínio perto dos 720°C (valor onde desliga), ativando automaticamente sempre que a temperatura se revele inferior a este limit

Durante as monitorizações efetuadas concluiu-se que o queimador de manutenção se encontra ativo em grande parte do tempo, mais especificamente cerca de 2 horas (não contínuas) a cada 3 horas de funcionamento do forno fusor.

O queimador de fundição é ativado, manualmente, pelo operador do forno sempre que se vai proceder a um carregamento de material (lingotes ou jito). Desta forma, o operador, também responsável pelo carregamento de metal, gere a utilização deste queimador consoante as necessidades de fundição.

A métrica de funcionamento do FF01 resume-se a carregamentos contínuos de metal (sob a forma de lingotes e jito) com a duração de aproximadamente 20 minutos, intercalados por períodos de fundição de cerca de 45 minutos. No final de cada carregamento, e mediante o alerta de nível de enchimento máximo, o operador desliga o queimador de fundição e o forno continua a fundir a liga durante os 45 minutos seguintes, recorrendo apenas ao queimador de manutenção.

### Aferição do custo específico de propano e do rendimento do forno

O seguinte procedimento teve como objetivo quantificar o custo específico do recurso energético no forno fusor FF01, ou seja, aferir o custo de propano por quilograma de liga de alumínio fundida e determinar o rendimento do equipamento. Para o efeito, efetuou-se uma monitorização do forno, que permitiu o levantamento de variáveis como o volume de propano consumido e a massa de metal fundido num ciclo de funcionamento.

Posteriormente, procedeu-se ao cálculo do valor teórico da energia envolvida no processo de fundição (da mesma massa) de alumínio e à confrontação deste valor com os resultados práticos.

### Monitorização

O controlo do consumo de volume de propano foi conseguido através da leitura do contador instalado junto ao forno. A partir do valor de densidade do gás, considerando o valor da pressão de serviço, foi possível determinar a massa de propano e a energia envolvidas no processo.

Simultaneamente, contabilizou-se o número de lingotes carregados durante a monitorização, para determinar a massa de liga fundida.

As equações utilizadas foram as seguintes:

$$m_{propano} (kg) = V * \rho$$

$$E (J) = m_{propano} * PCI$$

#### Estudo Teórico

O valor teórico de energia transmitida ao propano no processo de fundição foi obtido através da equação apresentada:

$$E (J) = m_{liga} c_{p\ liga} \Delta T$$

A massa de propano teoricamente necessária ao processo pode ser calculada a partir do valor teórico de energia determinado.

Finalmente, o rendimento do forno pode ser calculado da seguinte forma:

$$\eta = \frac{m_{liga} * c_{p\ liga} * \Delta T}{m_{propano} * PCI_{propano}}$$

Nas tabelas seguintes figuram os dados utilizados nos cálculos, bem como as variáveis monitorizadas e os resultados obtidos.

Tabela 56 - Dados utilizados nos cálculos.

| Massa de lingote (kg) | cp liga (J/kg°C) | ρ propano@50 mbar (kg/m³) | PCI propano (GJ/ton) | Preço tonelada de propano (€) |
|-----------------------|------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 9                     | 900              | 2,099                     | 46                   | 900                           |

Tabela 57 - Variáveis monitorizadas.

| T lingote à saída (°C) | T lingote à entrada (°C) | Nº lingotes de alumínio | Volume de propano consumido (m³) |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 720                    | 20                       | 64                      | 9,51                             |

Tabela 58 - Comparação entre valores teóricos e de funcionamento.

| Variável calculada                 | Monitorização | Cálculo Teórico |
|------------------------------------|---------------|-----------------|
| Massa de propano (kg)              | 19,96         | 7,89            |
| Custo de Propano (€)               | 17,97         | 7,10            |
| Massa de alumínio (kg)             | 576           | 576             |
| Energia envolvida no processo (GJ) | 0,92          | 0,36            |

*Tabela 59 - Resultados obtidos no procedimento.*

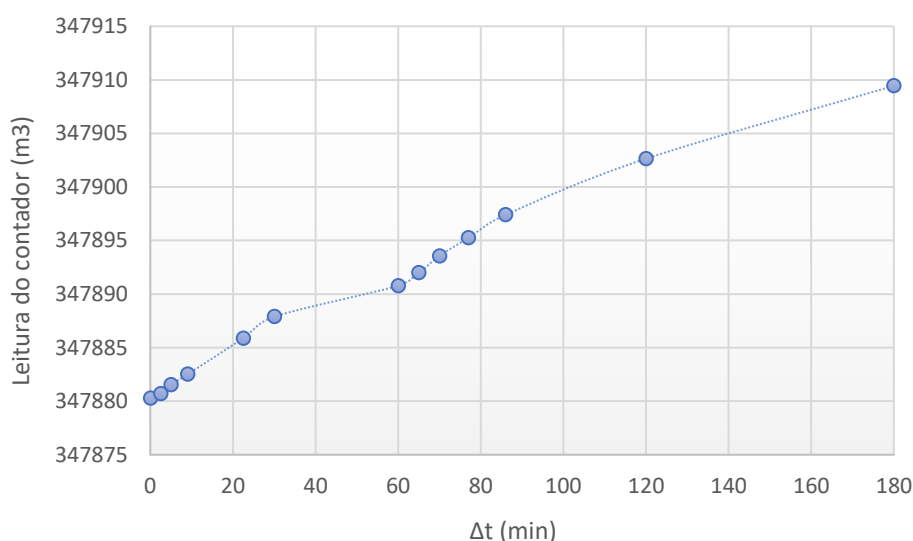
| <b>Rendimento do forno</b> | <b>Custo específico de propano<br/>(€/kg de alumínio)</b> |
|----------------------------|---|
| 0,40                       | 0,03  |

É possível concluir que existe uma diferença de cerca de 11€ relativamente ao custo teórico de propano necessário para fundição da massa de alumínio analisada. Esta perda pode estar associada aos fenómenos de perdas de energia por transferência de calor (condução, convecção e radiação) e, no caso específico da monitorização, a erros do operador.

Enquanto decorria o estudo, foi possível verificar que o operador não aguardou o tempo necessário para que o forno fundisse completamente o metal, tendo feito algumas tentativas de carregamento, cerca de 30/35 minutos após o último (em oposição aos supostos 45 minutos). Este procedimento deu origem a que o queimador de fusão fosse ativado de forma precipitada, gerando, desta forma, um consumo de propano superior ao necessário e desejável.

Torna-se evidente a necessidade de sensibilização dos operadores para que as condições de operação dos equipamentos sejam próximas das ideais, de forma a evitar perdas de energia associadas a erros deste tipo, em todas as fases do processo produtivo.

Os gráficos seguintes ilustram a variação de consumo de propano e de temperatura do forno durante o intervalo de tempo em que a monitorização decorreu.



*Gráfico 12 - Evolução do consumo de propano ao longo da monitorização.*



Através da observação do Gráfico 12, pode verificar-se que o valor da leitura de volume de propano, no contador, foi, logicamente, aumentando ao longo da monitorização, uma vez que o forno esteve sempre em funcionamento.

É também possível conferir que nos momentos de ativação do queimador de fundição o consumo de gás aumenta, o que se traduz numa maior variação do valor da leitura do contador nesses períodos. Esta situação é representada pelos declives mais acentuados da reta do gráfico.

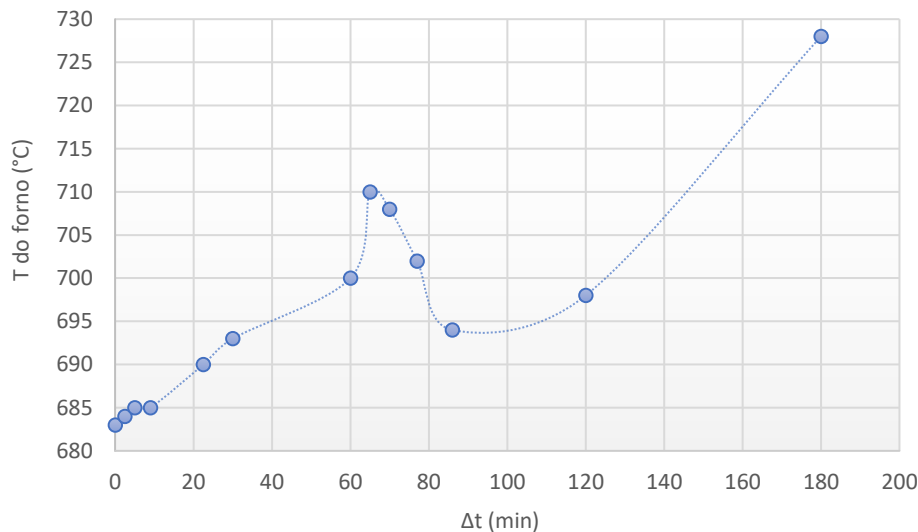


Gráfico 13 - Variação do valor de temperatura ao longo da monitorização.

O Gráfico 13 traduz com clareza o funcionamento deste equipamento.

No início do ciclo de carregamento, o queimador de fundição é ativado com antecedência, procedendo-se ao pré-aquecimento do forno. Nesta fase, não há metal no seu interior, portanto a variação de temperatura (sem resistência por parte do metal) é relativamente rápida, traduzindo-se num declive mais acentuado. Esta situação verifica-se nos primeiros 10 minutos da medição.

O forno tem um compartimento independente da câmara de fundição, que armazena o metal, de forma a possibilitar o carregamento simultâneo dos dois locais. O objetivo deste acessório é aumentar a eficiência do processo (e do recurso energético – propano). O metal começa a ser fundido imediatamente a partir do momento da entrada neste compartimento suplementar, mas não é logo liberto para a câmara, o que só acontece quando funde na totalidade.

Assim, a temperatura continua a aumentar no momento do carregamento de liga e jito. O metal que entra diretamente na câmara (porque o compartimento já está cheio) está mais frio, mas o queimador de fusão está ativado. Desta forma, a temperatura aumenta com um declive menor que o anterior, devido à inércia térmica associada aos lingotes.

Quando ocorre o enchimento máximo da câmara (aos 30 minutos) o sinal de alerta é emitido e o enchimento total (câmara + compartimento) é também máximo. Neste momento, termina o ciclo de carregamento e o operador desativa o queimador de fundição.

A fusão continua a ocorrer na câmara, que se encontra em contacto direto com o metal que acabou de ser carregado, mais frio, e desta vez com o queimador de fundição inativo. Esta situação traduz-se num declive novamente menor que o anterior, uma vez que o aquecimento se processa de forma mais lenta, a partir dos 30 minutos de medição.

O pico entre os 60 e os 65 minutos pode ser explicado pelo facto de o operador ter tentado carregar o forno de forma precoce, como explicado anteriormente, e ter ativado o queimador de fundição. Nesta altura, o metal da câmara já se encontra parcialmente fundido e não oferece tanta resistência à subida de temperatura, o que é ilustrado por um aumento súbito do seu valor, no gráfico.

Entretanto, o metal do compartimento, totalmente fundido e que já teve tempo de arrefecer, é então liberto para a câmara (que se encontra a uma temperatura muito superior à do metal), altura em que ocorre uma descida abrupta de temperatura.

No final do ciclo procede-se à remoção da liga fundida e, passado algum tempo, o forno inicia a recuperação de temperatura, estando pronto para iniciar um novo ciclo.